

高速実験炉「常陽」性能試験報告書
炉雑音特性(N T - 62)
——制御棒振動効果(1)——

1980年1月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

高速実験炉「常陽」性能試験報告書

炉雑音特性 (NT-62)

制御棒振動効果 (1)

佐野 健一* 大谷 秀二* 三田 敏男**
池上 哲雄*** 田村 誠司* 山本 寿*

要 旨

高速実験炉「常陽」の低出力および出力上昇試験期間中に1次冷却材の流動によって生じる制御棒振動の反応度への影響を調べるために、中性子束、制御棒荷重信号、制御棒駆動機構ハウジング上での音響信号および反応度信号を測定し解析した。

1次冷却材流量、制御棒位置および原子炉出力に関する種々の運転条件において測定した信号は多チャンネルデータレコーダに記録した。これを再生して周波数分析器により、パワースペクトル密度、コヒーレンス関数および rms 値を求めた。

その結果、以下のような特徴が認められた。

- (1) 制御棒(調整棒)駆動機構ハウジング上で検出される衝撃音は1次冷却材流量が100%に近付くと顕著になり、その生じる頻度は約2 Hzである。
- (2) 測定した信号ゆらぎのパワースペクトル密度には約2 Hzに顕著なピークがあり、信号間のコヒーレンス関数にも約2 Hzに顕著なピークがある。
- (3) 反応度ゆらぎの rms 値は制御棒が引き抜かれるにつれて減少し、50 MWでは約0.1%となる。

以上のことより、1次冷却材の流動により引き起こされる制御棒(調整棒)振動の周波数は約2 Hzであることと、50 MWでの制御棒振動による反応度ゆらぎの rms 値は約0.1%であり、原子炉制御には外乱を与えないことがわかった。

* 大洗工学センター高速実験炉部技術課

** 現在 日立製作所 エネルギー研究所

*** 現在 高速増殖炉開発本部

" JOYO " Start-Up Test Report
Control Rod Vibration (1)

Kenichi Sano*, Hideji Ohtani*,
Toshio Sanda**, Tetsuo Ikegami***,
Seiji Tamura* and Hisashi Yamamoto*

Abstract

Neutron flux, control rod (CR) load cell signals, CR acoustic signals and reactivity signal were measured and analyzed to study the effect of CR vibration induced by primary sodium flow during the low power and the power ascension tests of the Experimental Fast Reactor " Joyo ".

The measured signals were recorded by a multi-channel data recorder under various operating conditions of primary sodium flow, CR position and reactor power. Then the recorded signals were analyzed by a spectrum analyzer to obtain their power spectral density functions (PSD), coherence functions and r.m.s. values.

Following characteristics were determined.

- (1) Impact sound detected on housing of CR drive mechanism became obvious as the sodium flow rate reached 100%. Its frequency was about 2Hz.
- (2) The auto PSDs of the fluctuation of the measured signals had evident spectra at about 2Hz. Also the coherence functions between them showed more significant at about 2Hz.
- (3) The r.m.s. value of the fluctuation of reactivity signal decreased as a control rod was withdrawn. The r.m.s. value at 50Mw was about 0.1 ϕ .

* Reactor Technology Section, Experimental Fast Reactor Division, O-arai Engineering Center, PNC.

** Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd.

*** FBR Development Project, PNC.

Based on these results, the frequency of CR vibration due to the flow was about 2Hz. The r.m.s. value of reactivity fluctuation at 50MW mainly caused by the vibration was about 0.1 ϕ .

目 次

1. ま え が き	1
2. 系 統 設 備 の 概 要	2
2.1 炉 心 特 性	2
2.2 炉 心 構 成	2
2.3 制 御 棒 お よ び 制 御 棒 駆 動 機 構	2
2.4 中 性 子 計 装 設 備	3
2.5 音 響 検 出 系 お よ び 荷 重 検 出 系	3
3. 試 験 の 方 法	16
3.1 低 出 力 で の 試 験	16
3.2 高 出 力 で の 試 験	16
4. 試 験 結 果 と 考 察	25
4.1 流 量 変 化 に よ る 影 響	25
4.2 制 御 棒 位 置 お よ び 制 御 棒 種 類 に よ る 影 響	26
4.3 信 号 間 の 相 関	27
4.4 反 応 度 ゆ ら ぎ の rms 値	30
5. 検 討	57
5.1 調 整 棒 振 動 の 固 有 振 動 数	57
5.2 反 応 度 ゆ ら ぎ の 推 定 計 算	59
6. 結 言	64
付 録 1. 水 中 モ ッ ク ア ッ プ 試 験	66
付 録 2. 反 応 度 計	67
付 録 3. エ イ リ ア シ ン グ	69

1. ま え が き

高速実験炉「常陽」の制御棒は、調整棒 2 本、安全棒 4 本から構成されている。1 次冷却材流量を上昇させてゆけば、制御棒駆動機構ハウジング付近において、微弱な衝撃音を聞くことができる。この衝撃音の原因として、1 次冷却材流動による制御棒および延長管、燃料集合体、炉内構造物の振動が考えられる。この中で、制御棒および延長管は可動部分であるので、振動している可能性が大である。1 次冷却材流動により制御棒が振動すれば、中性子束に影響を与える。

高速実験炉「常陽」の低出力試験および出力上昇試験において、制御棒振動が中性子束へ与える影響を調べるために、制御棒振動効果の測定を行なった。低出力試験時には、1 次冷却材流量と制御棒位置をパラメータにして中性子束、制御棒駆動機構ハウジング音響信号を測定した。出力上昇試験時には、制御棒位置および制御棒をパラメータにして中性子束、反応度、制御棒ロードセル、制御棒駆動機構ハウジング音響信号を測定した。これらの解析結果より制御棒振動の状態と、その反応度への影響を検討した。

2. 系統設備の概要

2.1 炉心特性（設計値）

(1) 核特性

- 炉心中性子束（50 MW時最大） 1.9×10^{15} nv
- 動特性パラメータ

	制御棒引抜時	制御棒6本挿入時
即発中性子寿命 ℓ_p (sec)	2.804×10^{-7}	1.936×10^{-7}
遅発中性子割合 β_{eff}	5.007×10^{-3}	4.963×10^{-3}
β_{eff} / ℓ_p (sec ⁻¹)	1.79×10^4	2.56×10^4

◦ 制御棒特性

制御棒反応度値（1本）	1.4% $\Delta k/k$ 以上
反応度付加率	0.015% $\Delta k/k/sec$ 以下
全制御棒反応度	8.4% $\Delta k/k$ 以上

(2) 熱特性（最大出力時）

- 原子炉熱出力 50 MW
- 出力密度（最大） 374 kW/ℓ
- 1次冷却材流量 2200 t/h
- 冷却材温度 原子炉入口/出口 370/435℃

2.2 炉心構成

50 MW出力上昇試験時の炉心部の構成をFig. 2.1に示す。制御棒は全部で6本あり、そのうち調整棒が2本（RR1, RR2）、安全棒が4本（SR1～4）である。

2.3 制御棒および制御棒駆動機構

制御棒は、4本の安全棒と2本の調整棒より成る。安全棒は、すべて運転中引抜かれた状態にあり、原子炉及びプラントの異常状態の検出信号によって急速かつ安全に原子炉を停止する。

調整棒は、起動時および運転時の出力レベルの変更、燃料の燃焼にともなう反応度変化および燃料集合体の熱湾曲等による反応度変化を調整する。

安全棒と調整棒は、等量のB₄C吸収材を内蔵し、保護管の肉厚および外径寸法が異なる以外はまったく同一の構造を有している。

Fig. 2.2 に制御棒の構造を示す。制御棒は、 B^{10} 濃縮 B_4C ペレットを SUS 316 ステンレス鋼管で被覆した制御棒要素 7 本を、円形断面を有する SUS 316 ステンレス鋼製保護管内に三角形格子状に配列固定した構造をもち、上端にハンドリングヘッド、下端にスクラム時減速用のダッシュラムを有し、その全長は約 2250 mm である。安全棒用冷却材は低圧プレナムより、調整棒用冷却材は高圧プレナムより導入する。

制御棒駆動機構は、Fig. 2.3 と Fig. 2.4 に示してあるが、安全棒用 4 基と調整棒用 2 基より成り、炉心上部機構を貫通して設置され、電動機駆動により制御棒の引抜、挿入動作を行なう。安全棒のスクラム動作は、保持電磁石の消磁により駆動装置に連結されている安全棒を解放し、スプリングと自重で急速落下させる。駆動電動機に減速歯車を介して結合されたシンクロ発信器は、制御棒の位置信号を中央制御室の位置指示計に伝送し表示する。延長管は、駆動機構と制御棒を連結するための管で、内側延長管の下端にフィンガー動作棒が、外側延長管の下端にラッチフィンガーが結合している。内側、外側延長管の相対的な動きによって、制御棒のハンドリングヘッドをラッチフィンガーが作用して制御棒の着脱を行う。

2.4 中性子計装設備

中性子計装設備は、起動計、中間系、線形出力系の 3 系統から成り、安全確保のため、それぞれ 2 または 3 の計測系で構成されている。起動計、中間系は、核分裂計数管で、線計出力計は、 γ 線補償型電離箱 (CIC) である。Fig. 2.5 に中性子計装設備の配置を示す。

以上の本設中性子計装設備の他に、試験測定用として低出力試験時には、炉心中心の燃料集合体頂部近くまで挿入されていた遮蔽試験用プラグ内に ^3He 電離箱型中性子検出器を設置し、出力上昇試験時には、特設 ch.9 の検出孔に CIC を設置した。これらの検出器の上下方向の位置は ^3He 電離箱型中性子検出器では、燃料集合体頂部近く、ch.9 の CIC では炉心中心位置である。

2.5 音響検出系および荷重検出系

制御棒振動による衝撃音を検出するために、制御棒駆動機構のハウジングに加速度計を取り付けた。取り付け位置は Fig. 2.3, 2.4 に示してある。取り付け方法はビニールテープまたは接着剤 (アラルダイト) による固定である。使用した軽量小型加速度計の仕様を Table 2.1 に、温度特性と周波数特性を Fig. 2.6 に示す。加速度計から後の検出系としては、炉内音響検出系を使用した。そのブロック図を Fig. 2.7 に示してあるが、この図では 2 チャンネルを炉内音響に、残りの 1 チャンネルを RR2 ハウジング音響に使用している。測定に使用したこの炉内音響検出系のプリアンプの周波数特性を Fig. 2.8 に、メインアンプのそれを

Fig. 2.9に示す。炉内音響検出系は、数十kHzの信号を対象としたものであるが、ハウジングの加速度計で検出される数百Hzから数kHzの信号も十分に処理できる。また、これらの信号の解析およびrms値のペンコレーダによる記録にも炉内音響検出系を使用した。

制御棒振動による延長管と制御棒の荷重変化を検出するために、制御棒駆動機構のハウジング内に設置されているロードセルからの荷重信号を測定した。ロードセルの位置をFig. 2.3, 2.4に、荷重検出系の原理図をFig. 2.10に示す。この荷重検出系は本設の装置であり、制御棒駆動装置内に取り付けられた2個の荷重検出器(ロードセル…250kg用)からの信号は加算されて指示計に入る。この指示計はロードセルからの出力信号に対し連続的に比較するフィードバック電圧をもつ閉ループサーボ系である。指示計からは、超過荷重設定器、制御棒荷重設定器、及び中央制御室の指示計へ、ポテンショメータの信号を送っている。このポテンショメータは指示計に内蔵されたサーボモータと連動させるようになっている。測定したロードセル信号は、中央制御室の荷重指示計の前で絶縁型増幅器を通して取り出したものである。

Table 2.1 Specifications for Model 2222B Accelerometer
(According to ANSI and ISA Standards)

DYNAMIC	NOTES
CHARGE SENSITIVITY ¹ 1.4pC/g, nominal; 1.0pC/g, minimum	¹ Use Endevco ® Model 2640, 2680, or 2700 Series Charge Amplifiers.
VOLTAGE SENSITIVITY ² 3.3mV/g, nominal	² With 35 pF replaceable cable.
MOUNTED RESONANCE FREQUENCY .. 32000Hz, nominal	³ In shock measurements, minimum pulse duration for half sine or triangular pulses should exceed 0.17 ms to avoid excessive high-frequency ringing. (See Endevco Piezoelectric Accelerometer Manual.)
FREQUENCY RESPONSE ³ ±5%, 20 to 6000Hz, ref. 100Hz	⁴ Transverse sensitivity of 3% maximum is available on special order.
TRANSVERSE SENSITIVITY 5% maximum ⁴ AMPLITUDE LINEARITY, RANGE Sensitivity increases approxi- mately 1% per 200 g, 0 to 2000 g ⁵	⁵ Shocks in the range of 500 to 2000g may result in temporary zero shifts of up to 4%. Such shifts will result in erroneous data if the accelerometer is used with integrating circuits to obtain velocity or displacement information.
ELECTRICAL	⁶ Signal ground to mounting surface, depending on adhesive used.
TRANSDUCER CAPACITANCE ² 420pF, nominal at 72 °F	
TRANSDUCER RESISTANCE 20000MΩ, minimum, at 72 °F 5000MΩ, minimum, at 350 °F	
INSULATION RESISTANCE ⁶ 1MΩ, minimum, at 100 Vdc	
INSULATION CAPACITANCE ⁶ 250 pF, nominal	

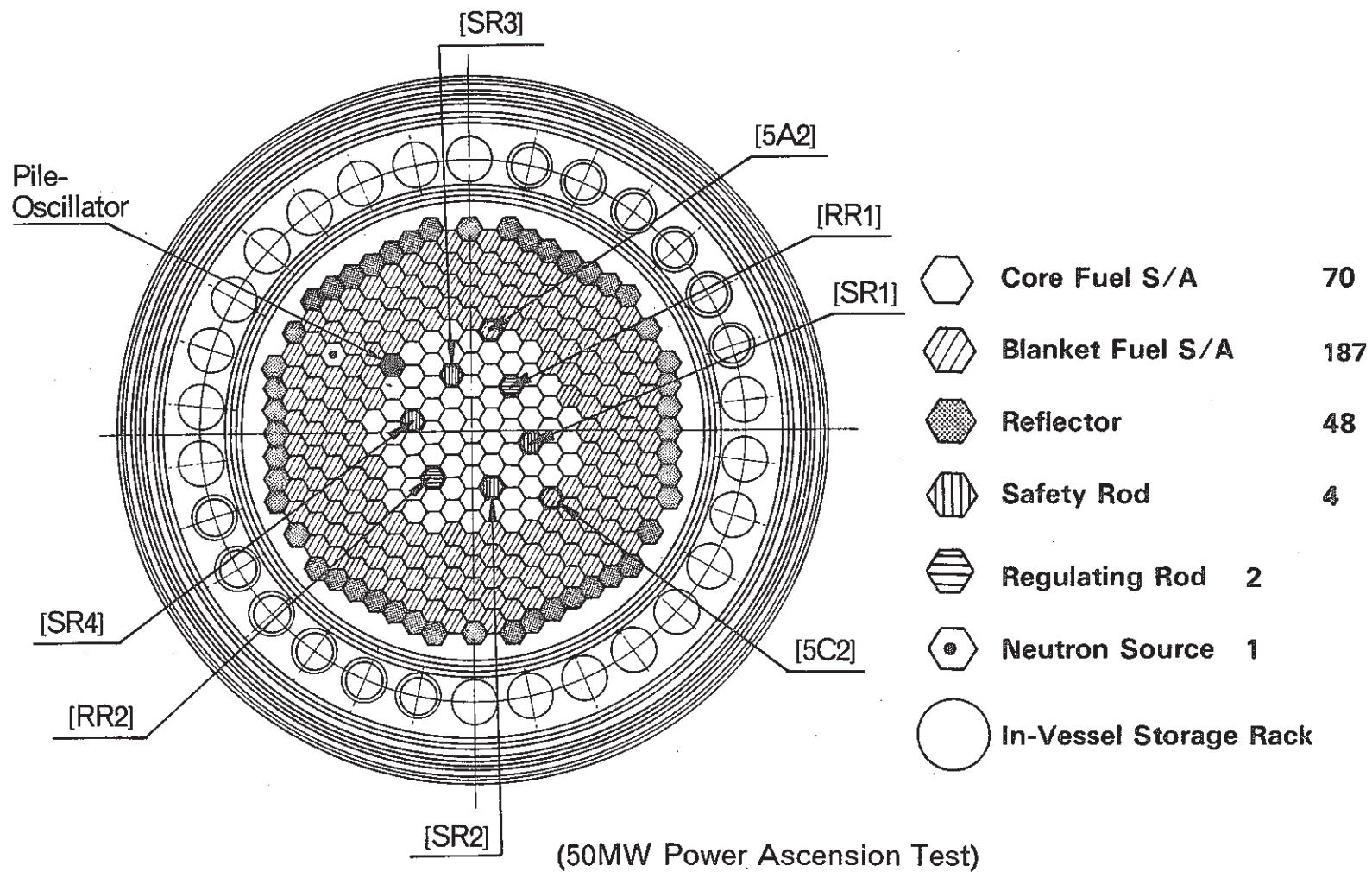


Fig.2.1 Core Arrangement

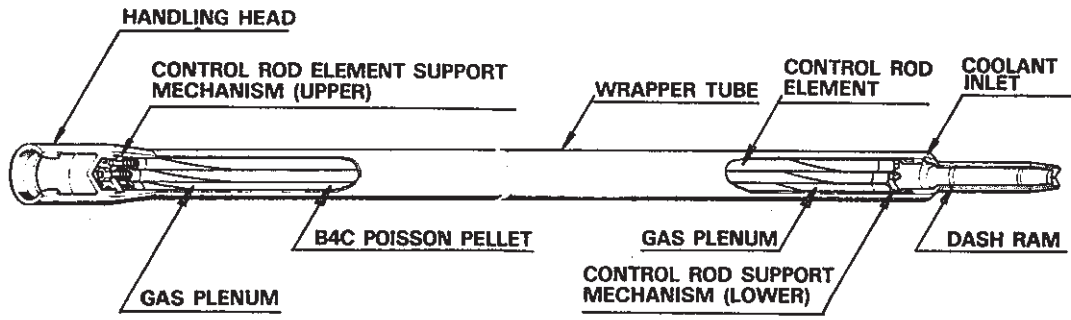


Fig.2.2 Control Rod

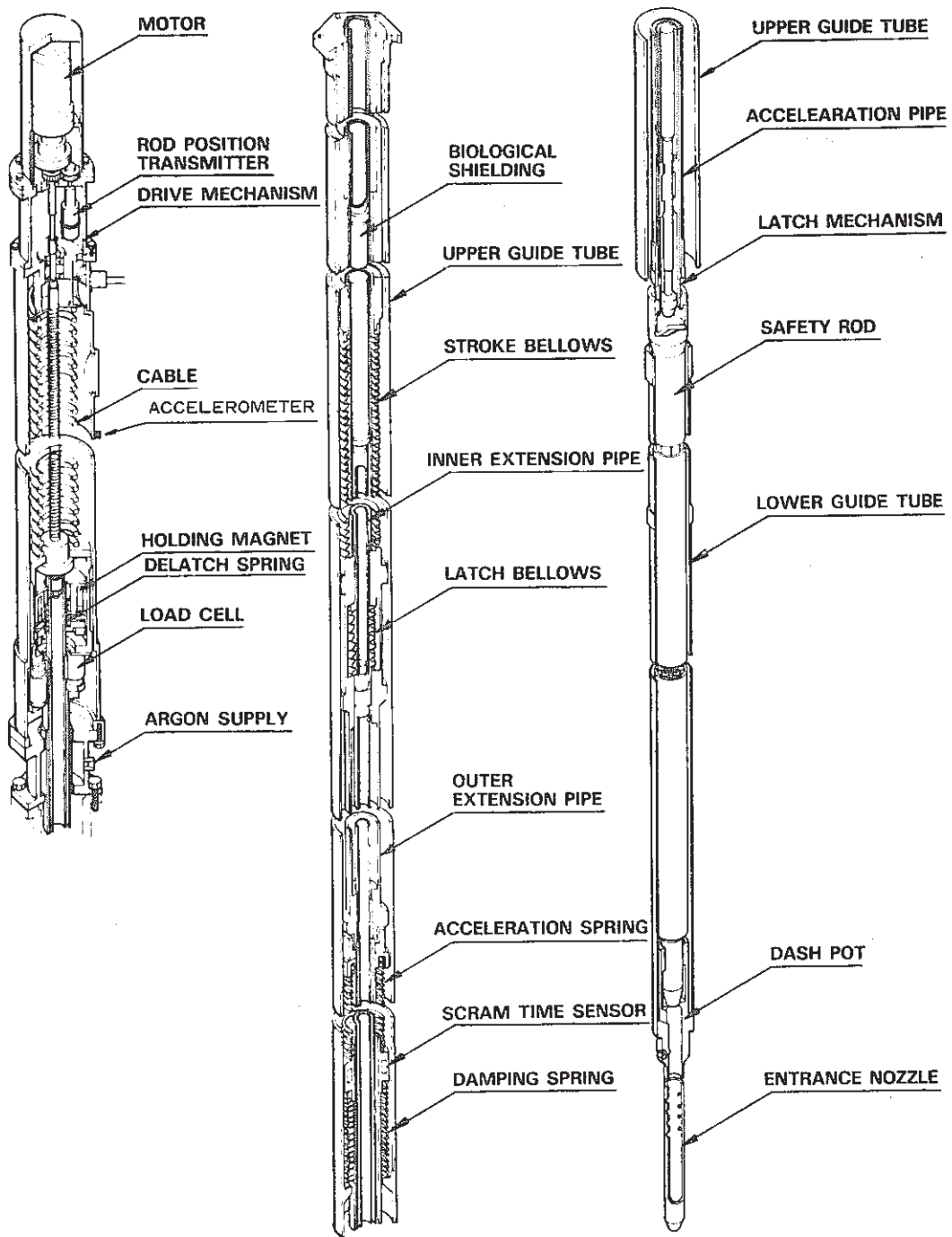


Fig.2.3 Safety Rod Drive Mechanism

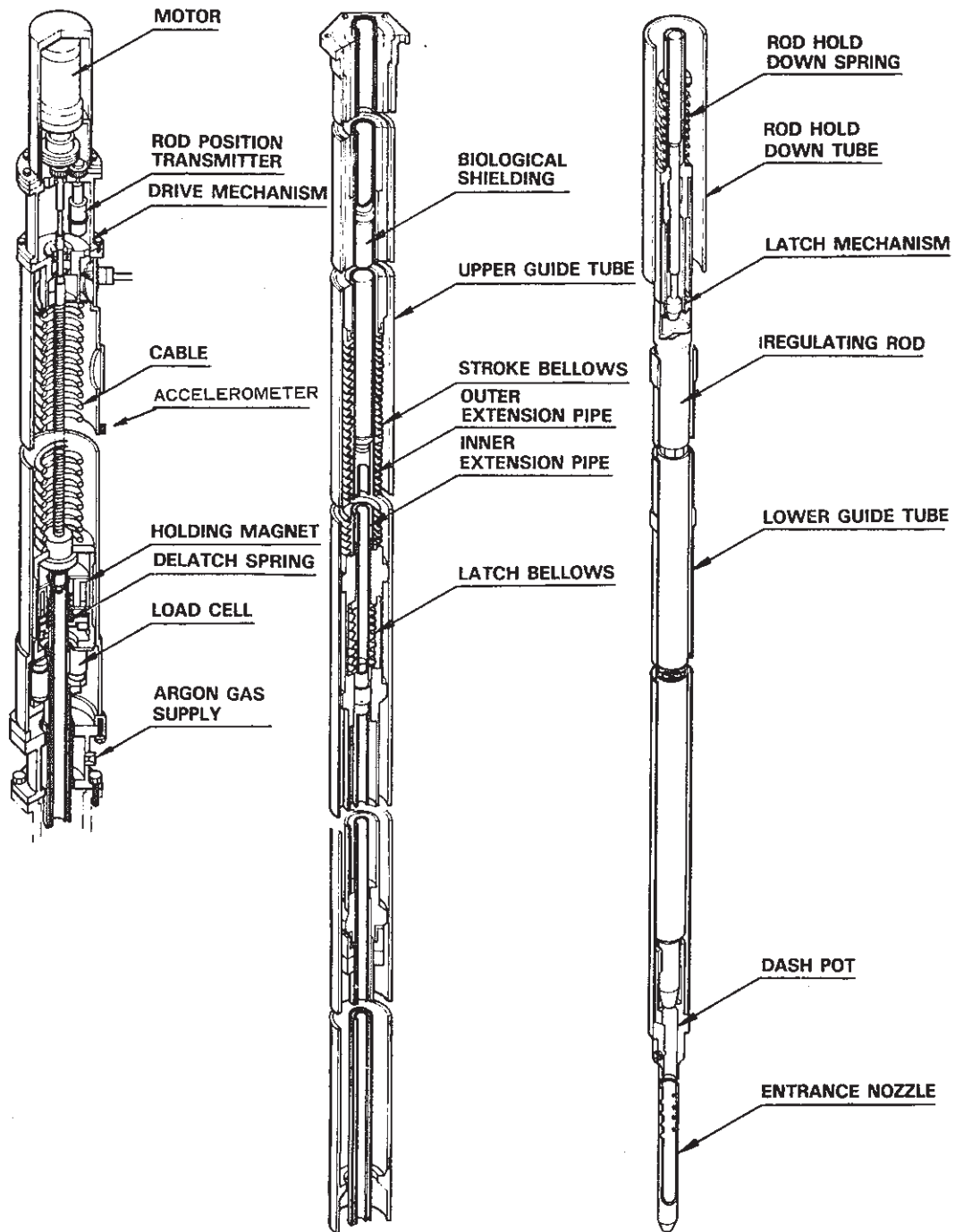


Fig.2.4 Regulation Rod and Drive Mechanism

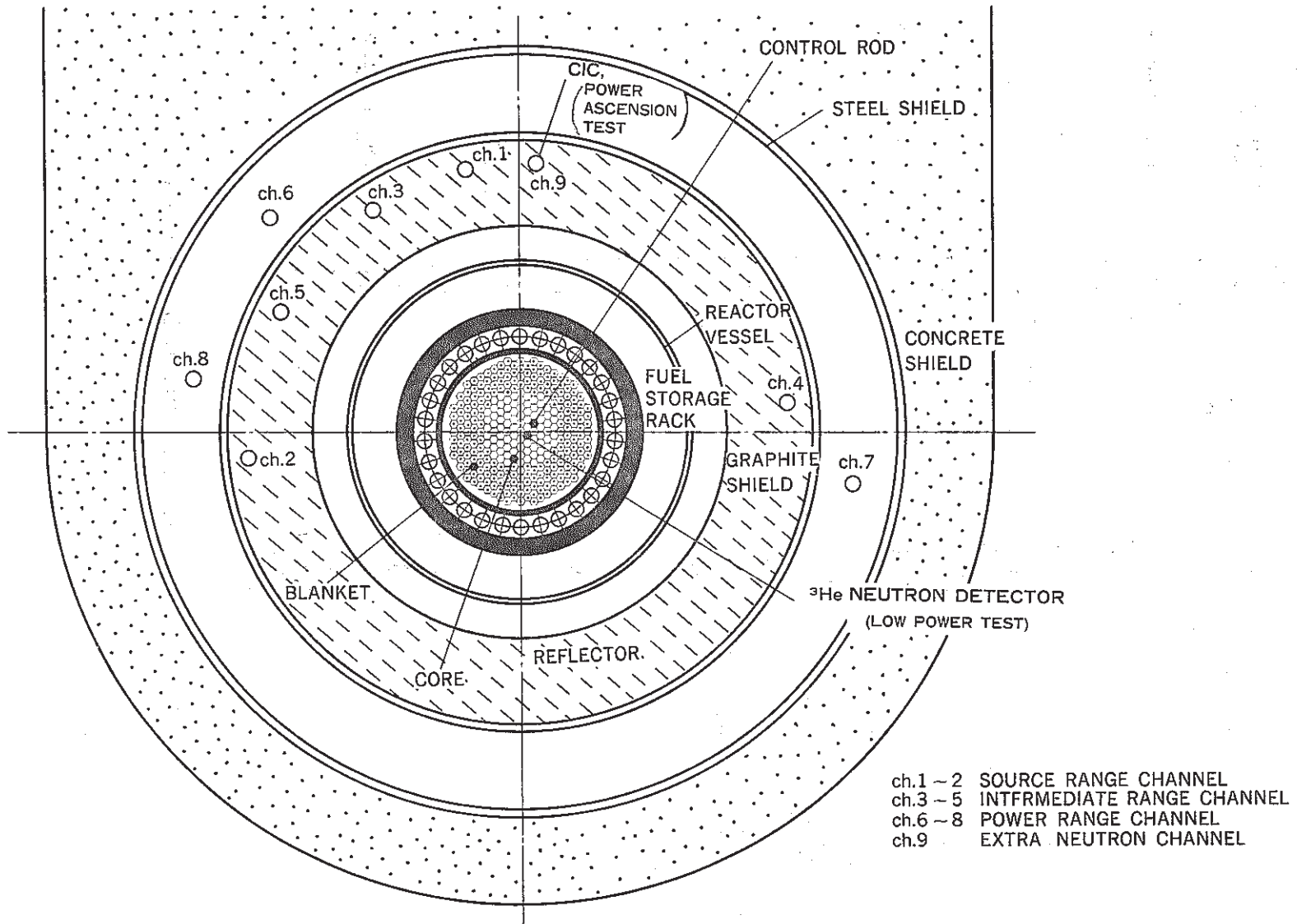


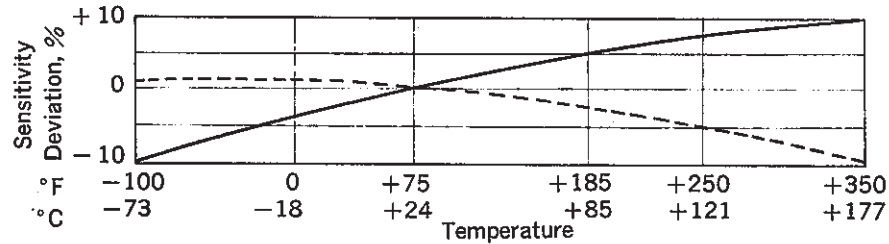
Fig.2.5 NEUTRON COUNTER LOCATION

MICROMINIATURE ACCELEROMETER MODEL 2222B



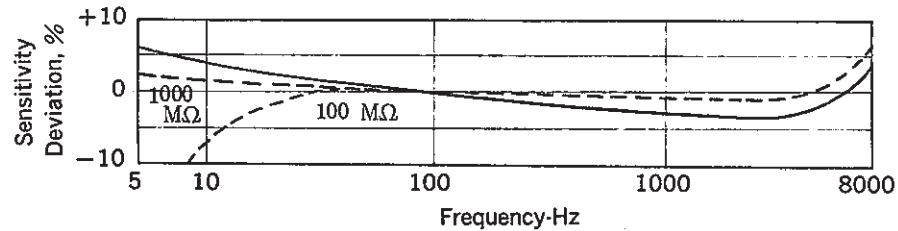
ACTUAL SIZE

(A) TYPICAL TEMPERATURE RESPONSE



The solid line shows the nominal charge-temperature response. The broken line shows the nominal voltage-temperature response with 300 pF of external cable capacitance.

(B) TYPICAL FREQUENCY RESPONSE



The solid line shows the nominal charge-frequency response. The broken lines show the voltage-frequency response with the cable supplied and the indicated loads.

Fig. 2.6 Temperature and frequency response of accelerometer (model 2222B)

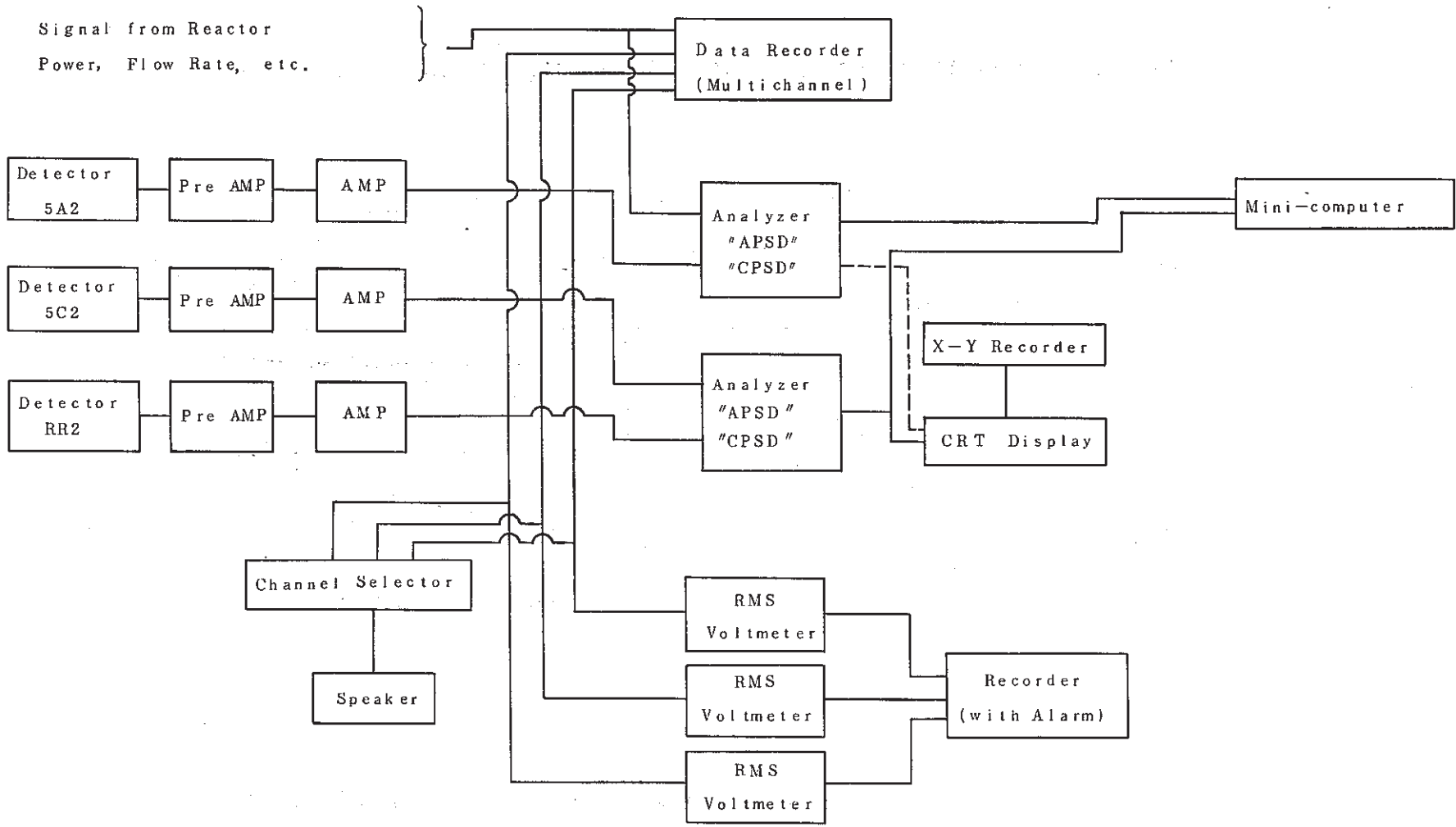


Fig.2.7 Block Diagram of Acoustic In-core Malfunction Detection System

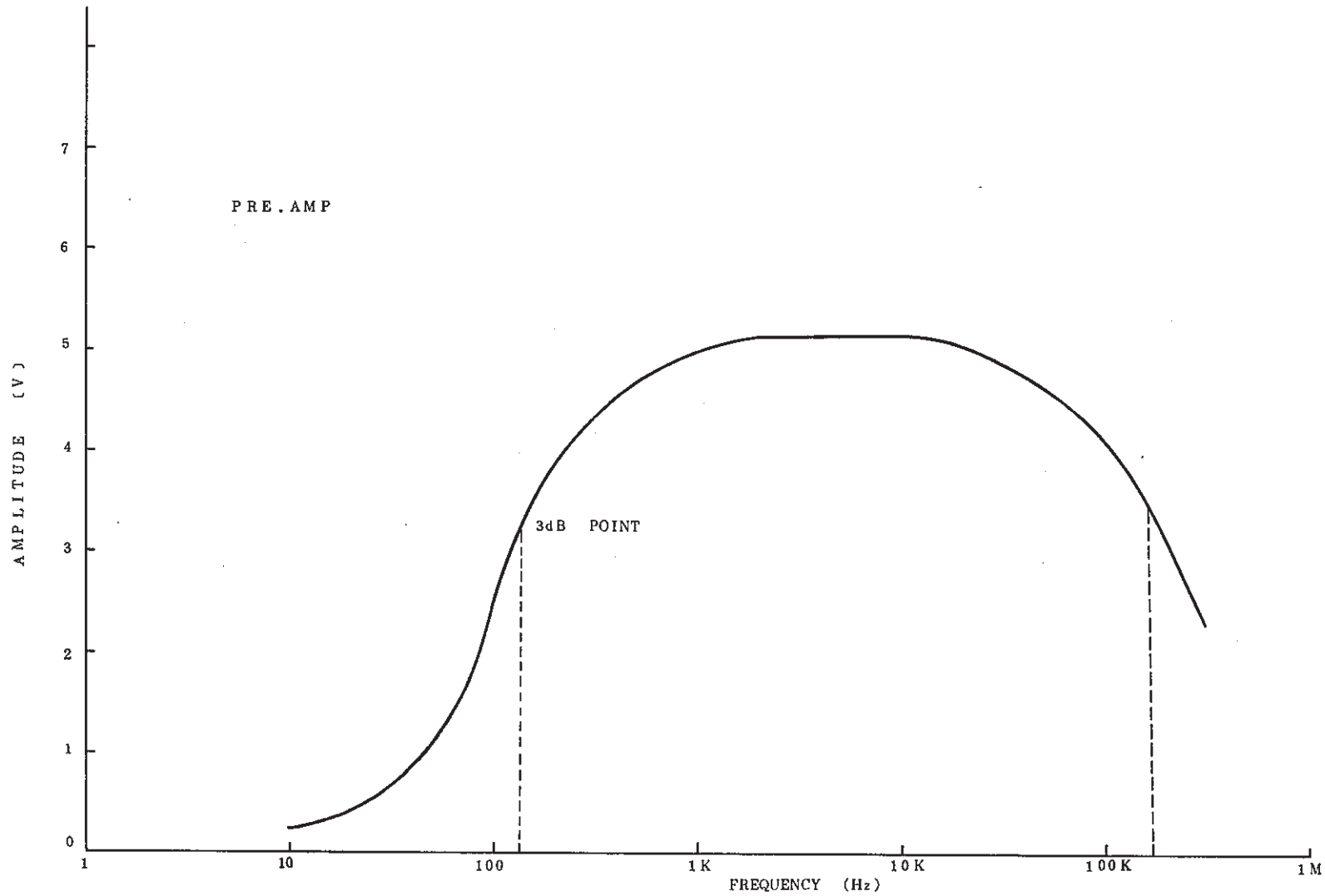


Fig.2.8 Frequency response of a pre. amplifier of the acoustic malfunction detection system

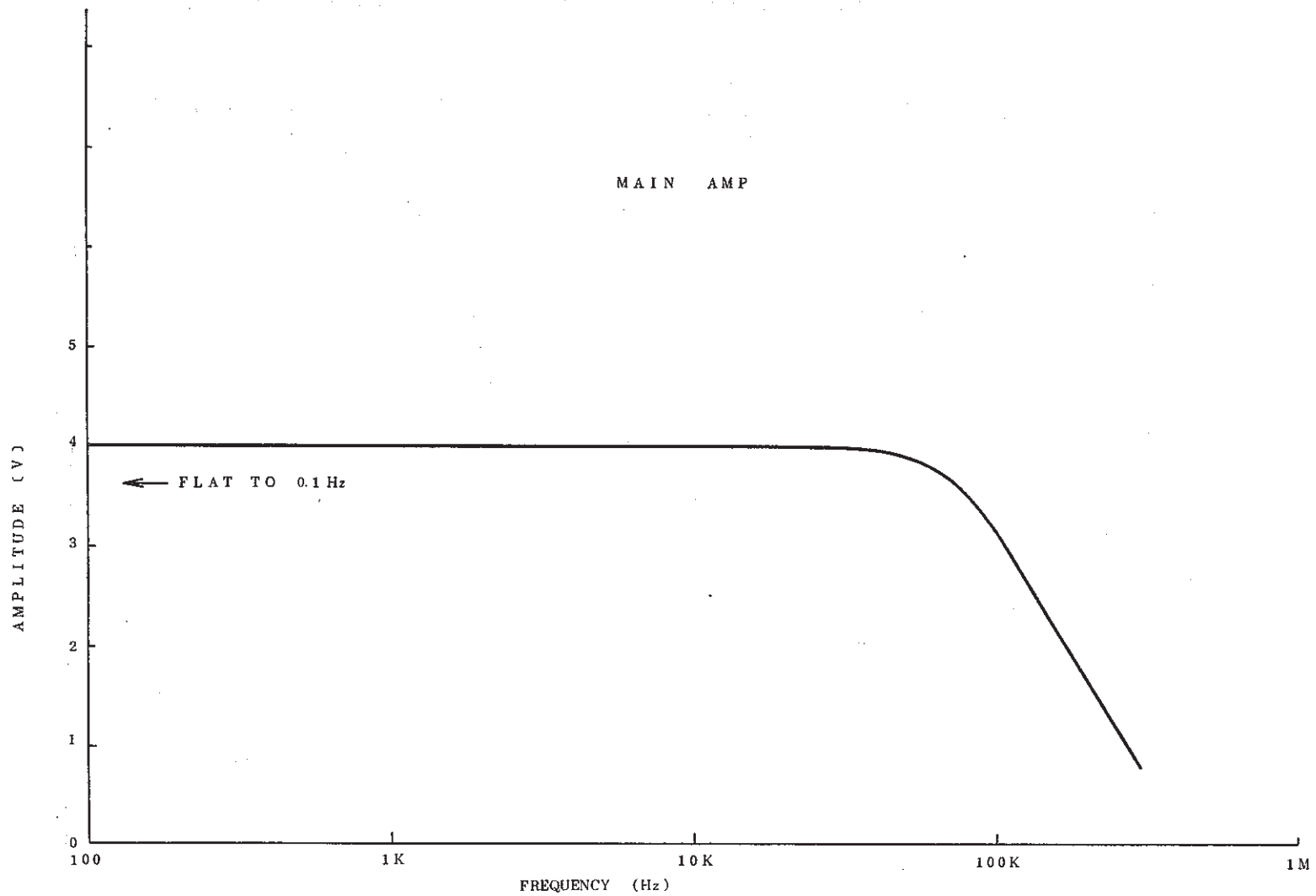


Fig.2.9 Frequency response of a main amplifier of the in-core acoustic malfunction detection system

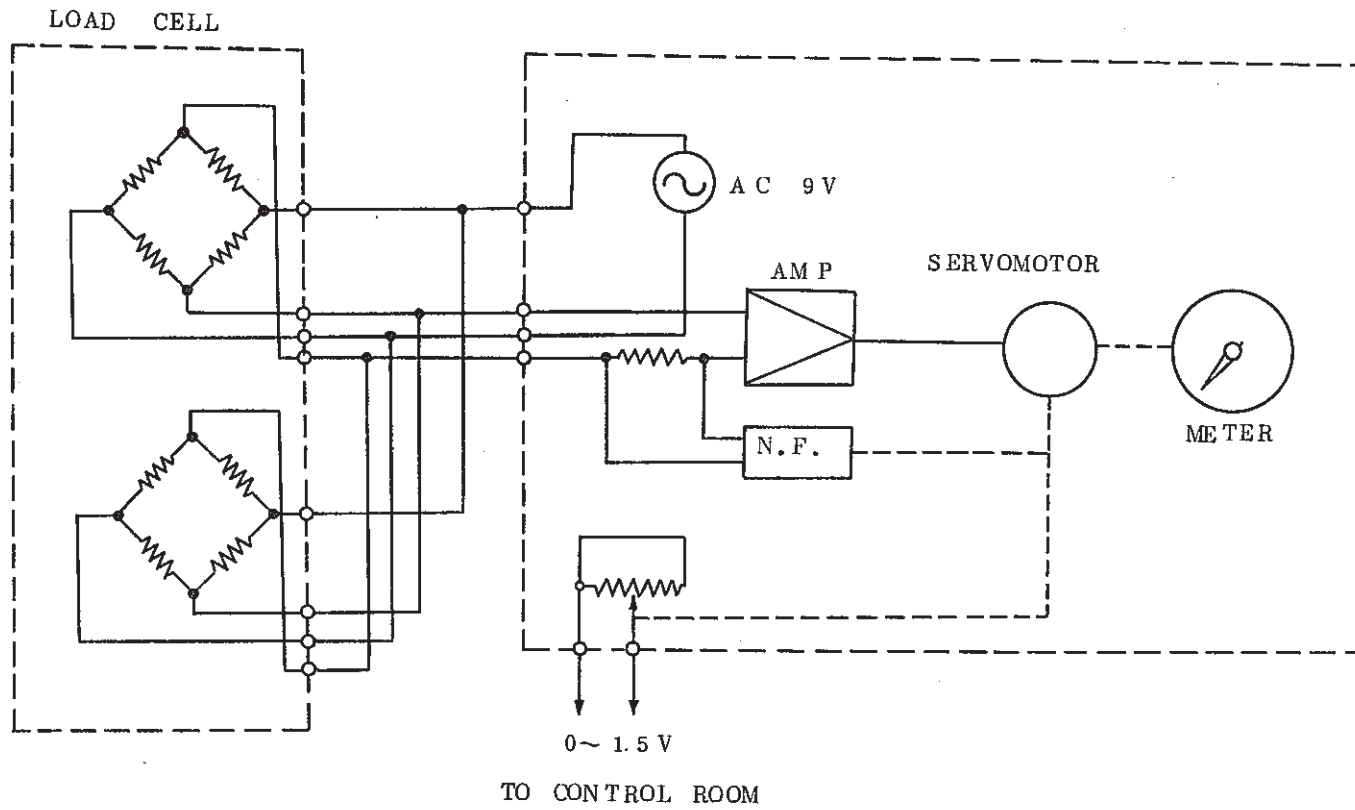


Fig.2.10 Block diagram of load cell system of CRD

3. 試験の方法

3.1 低出力での試験

低出力試験期間中に行なった制御棒振動効果試験における測定条件と測定信号をTable 3.1に示す。2種類の制御棒パターンで1次冷却材流量を変化させ、中性子束とハウジング音響信号を多チャンネルデータレコーダに記録した。中性子束信号としては、炉心中心位置に設置された遮蔽試験用プラグ内に挿入した³He電離箱型中性子検出器、およびグラフィイト中のch.9検出孔（Fig. 2.5参照）に挿入したガンマ線補償型電離箱（CIC）からの信号を用いた。前者では検出器と炉心との間に遮蔽体はないが、後者では検出器は減速材中にある。音響信号は調整棒1および2の駆動機構ハウジングにビニールテープで取り付けられた加速度計からの信号である。

測定系とデータ解析系のブロック図をFig. 3.1に示す。中性子測定系ではアンメータ出力をサプレッションアンプに入力して信号の平均値成分を除去し、ゆらぎ成分のみを増幅した。中性子束信号には50 Hz成分が混入していたので、0.1 Hz～20 Hzの帯域のバンドパスフィルタで50 Hz成分を除去し、その後アンプで再度増幅してから多チャンネルデータレコーダで記録した。使用したサプレッションアンプの周波数特性はDCから3 kHz（3 dB低下）までの利得は平坦である。音響測定系は炉内音響検出系を使用しており、メインアンプのDC/ACアンプは前段がDCアンプで後段がACアンプである。多チャンネルデータレコーダへの記録は約20分間である。解析系では相関計でデジタルサンプリングが行なわれる為、エイリアシング防止のためにバンドパスフィルタを使用した。その帯域はサンプリング間隔 ΔT より決められるナイキスト周波数 $1/2\Delta T$ と、その $1/100$ の周波数の間とした。エイリアシングに関しては付録3で述べる。得られたパワースペクトルはXYレコーダで記録した。音響信号の解析で、制御棒振動による衝撃頻度である数Hz成分を対象とする場合は、RMS変換器を使用して音響信号の包絡線（の0.7倍）に対応する信号に変換した信号を解析した。このRMS変換器の機能をFig. 3.2に示す。使用した変換器は回路の都合上、負極性のRMS変換信号が出力される。

3.2 高出力での試験

高速実験炉「常陽」の50 MW出力上昇試験期間中に行なった制御棒振動効果試験における測定について以下に述べる。

Table 3.2は原子炉出力20 kWで行なった測定での制御棒位置である。1本の制御棒を

300 mmに固定して、他の制御棒をほぼ上端位置にし、1本の制御棒の振動効果のみを調べた。さらに調整棒2を数本の引抜き位置で固定して測定した。1次冷却材流量は100%である。調整棒の上端位置は700 mmであり、安全棒の上端位置は900 mmである。

Table 3.3は原子炉出力50 MWで測定した時の制御棒位置である。2本の調整棒が同位置のパターン、および一方が全引抜きのパターンである。1次冷却材流量は100%である。

Table 3.4は測定した信号名である。20 kWの制御棒ロードセルとハウジング音響信号に〔Movable〕とあるのは、測定ケースごとに信号を変えたものである。中性子束信号はグラファイト中のch.9に設置されたCICからの信号である。反応度信号は、中性子束ch.9を入力とした反応度計の出力である。この反応度計は、動特性方程式にもとづいて中性子束より反応度をアナログ演算する回路であり、詳しくは付録2で述べる。S/A 出口Na温度は、炉心アドレス〔0〕の燃料集合体出口にある熱電対からの信号である。S/A 出口Na流量は、炉心アドレス〔0〕の燃料集合体出口にある、うず電流形流量計からの流量信号である。ハウジング音響信号は、制御棒駆動機構ハウジングに接着剤で固定した加速度計からの信号であるが〔Movable〕の場合は、1つの加速度計を各ケースごとに対象とするハウジングにビニールテープで張り付けた。RMS変換ハウジング音響信号は、ハウジング音響信号をRMS変換器に通して、音響信号の包絡線（の0.7倍）に対応する信号に変換したものである。Table 3.4の下部に〔Movable〕の各ケースにおける対象を示す。

Fig. 3.3に測定系のブロック図を示す。熱電対からの温度信号には、50 Hz雑音が顕著に含まれていたため、50 Hzバンド・エリミネーション・フィルタを通した。ハウジング音響RMS変換信号以外の信号でDC成分を含んでいる信号は、サプレッション・アンプに通して、ゆらぎ成分を増幅して多チャンネル・データレコーダに記録した。記録時間は約20分間である。

解析系ブロック図はFig. 3.4に示してあり、エイリアシング防止のバンドパスフィルタの帯域は3.1で述べたのと同じである。自己パワースペクトルを求める時は1信号を相関計に入力し（Fig. 3.4中の——）、相互パワースペクトルを求めるときには2信号を入力した（Fig. 3.4中の…）。

Table 3.1 Reactor condition and measured signals

CASE	PRIMARY FLOW RATE (%)	RR1 POSITION (mm)	RR2 POSITION (mm)	S/A OUTLET TEMP. (°C)	NEUTRON FLUX CH1 (CPS)	MEASURED SIGNAL
1	20	350.0	343.7	236	1×10^4 (1.3 kW)	NEUTRON FLUX
2		622.7	40.0	250		
3	50	350.0	345.5	237		CRD HOUSING ACOUSTIC SIGNAL
4		622.2	40.0	249		
5	100	350.0	359.3	248		
6		627.7	40.0	248		

*RR : REGULATION ROD

*CRD : CONTROL ROD DRIVE MECHANISM

*S/A OUTLET TEMP : MEAN VALUE OF [1A1],[2A1],[3A1],[4A1],[1D1],[2D1],[3D1], AND [4D1].

Table 3.2 Control rod positions (20 kW)

Case	Test Number	RR1	RR2	SR1	SR2	SR3	SR4
1	CR-21	300.0	UL	577.0	UL	UL	UL
2	CR-22	UL	300.0	596.9	UL	UL	UL
3	CR-23	UL	UL	507.8	UL	UL	300.0
4	CR-24	UL	UL	605.8	UL	300.0	UL
5	CR-25	UL	UL	599.5	300.0	UL	UL
6	CR-26	UL	UL	300.0	UL	632.0	UL
7	CR-27	UL	245.7	UL	UL	UL	UL
8	CR-28	UL	350.0	513.7	UL	UL	UL
9	CR-29	UL	400.2	513.7	UL	UL	574.0
10	CR-30	UL	450.1	513.7	571.3	UL	574.0
11	CR-31	UL	500.0	513.7	571.3	596.9	574.0

UL : Upper Limit (RR1 , RR2 = 700 SR1 , SR2 , SR3 , SR4 = 900)
 primary coolant flow rate : 100 %
 reactor inlet temperature : 252 ~ 255 °C
 reactor outlet temperature : 253 ~ 256 °C

Table 3.3 Control rod positions (50 MW)

Case	Test Number	RR1	RR2	SR1	SR2	SR3	SR4
1	50 MW-1	409.8	UL	UL	UL	UL	UL
2	50 MW-2	UL	410.9	UL	UL	UL	UL
3	50 MW-3	511.1	511.1	UL	UL	UL	UL
4	50 MW-4	470.0	558.4	UL	UL	UL	UL

UL : Upper Limit (RR1 , RR2 = 700 SR1 , SR2 , SR3 , SR4 = 900)
 primary coolant flow rate : 100 %
 reactor inlet temperature : 360 ~ 361 °C
 reactor outlet temperature : 420 ~ 423 °C

Table 3.4 Measured Signals

Signals	20 kW	50 MW
Control Rod Load Cell	[RR1] [RR2] [Movable]	[RR1] [RR2] [SR4]
Neutron Flux	Ch 6 Ch 7 Ch 8 Ch 9	
Reactivity	Reactivity Meter (Neutron Flux Ch9)	
S/A Outlet Sodium Temp.	T/C [0]	
S/A Outlet Sodium Flow	Flow Meter [0]	
Housing Acoustic Signal	[RR2] [SR4] [Movable]	[RR1] [RR2]
RMS Converted Housing Acoustic Signal	[RR1] [RR2]	

[Movable] : Different Signal in Each Case

Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Control Rod Load Cell [Movable]	RR1	RR2	SR4	SR3	SR2	SR1	RR2	RR2	RR2	RR2	RR2
Housing Acoustic Signal [Movable]	RR1	RR1	RR1	SR3	SR2	SR1	SR1	SR1	SR1	SR1	SR1

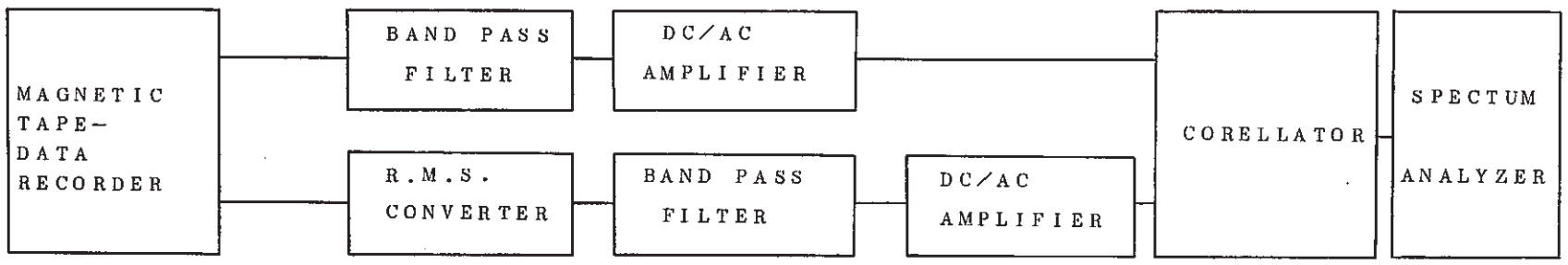
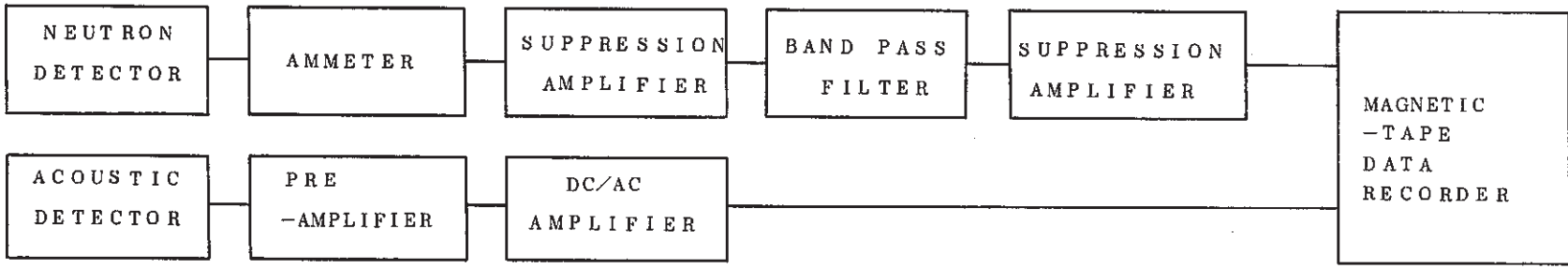


Fig.3.1 BLOCKDIAGRAM OF MEASURING AND ANALYZING SYSTEM

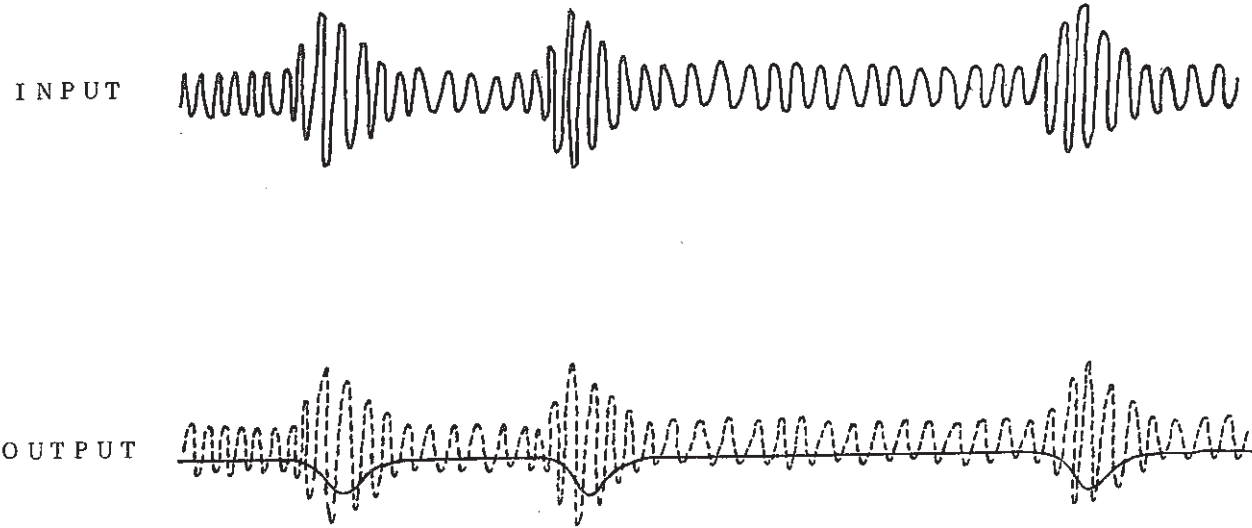


Fig.3.2 R.M.S. Converted Signal by the R.M.S. Converter

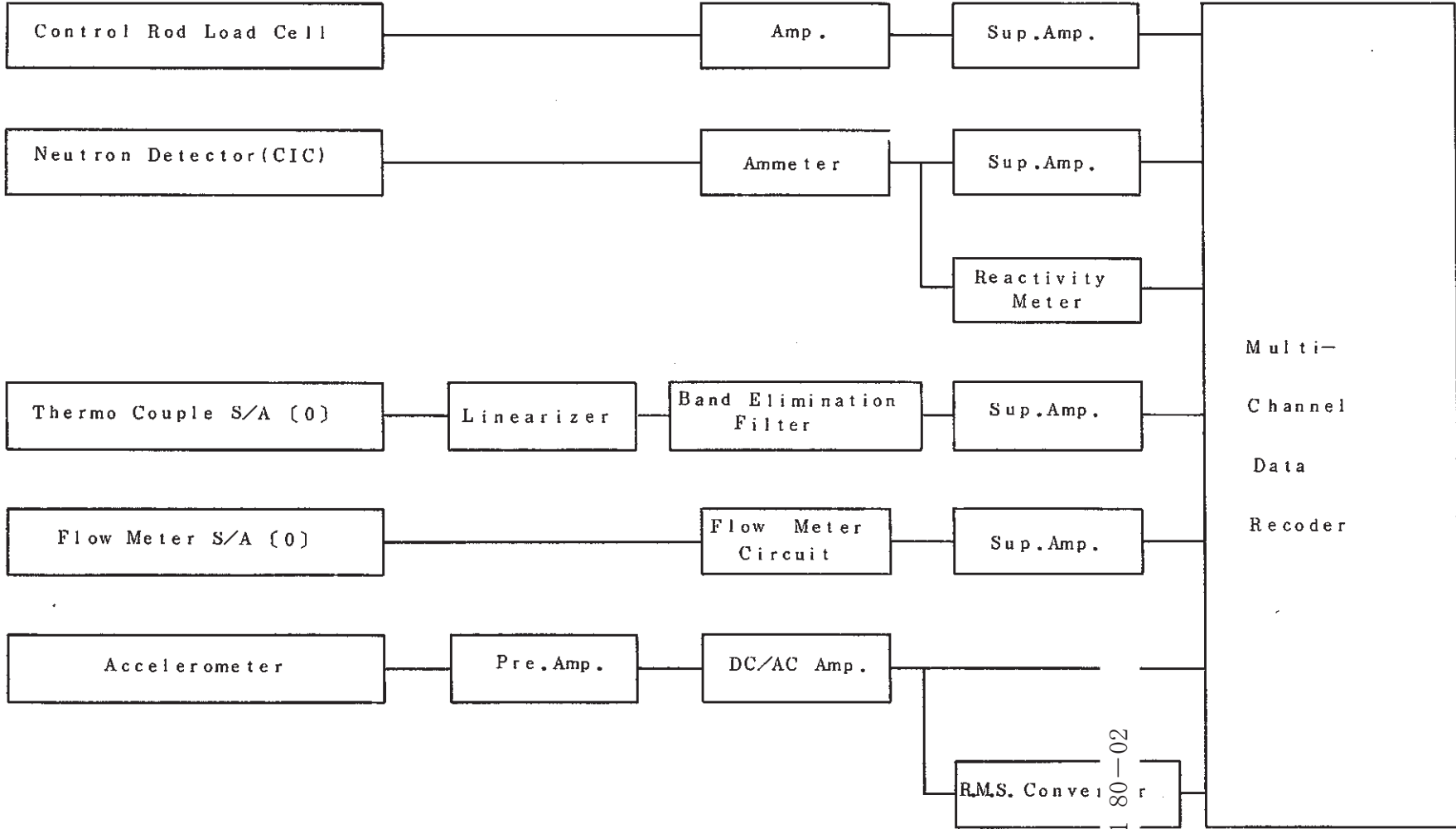


Fig.3.3 Block Diagram of Measuring System

PNC TN941 80-02

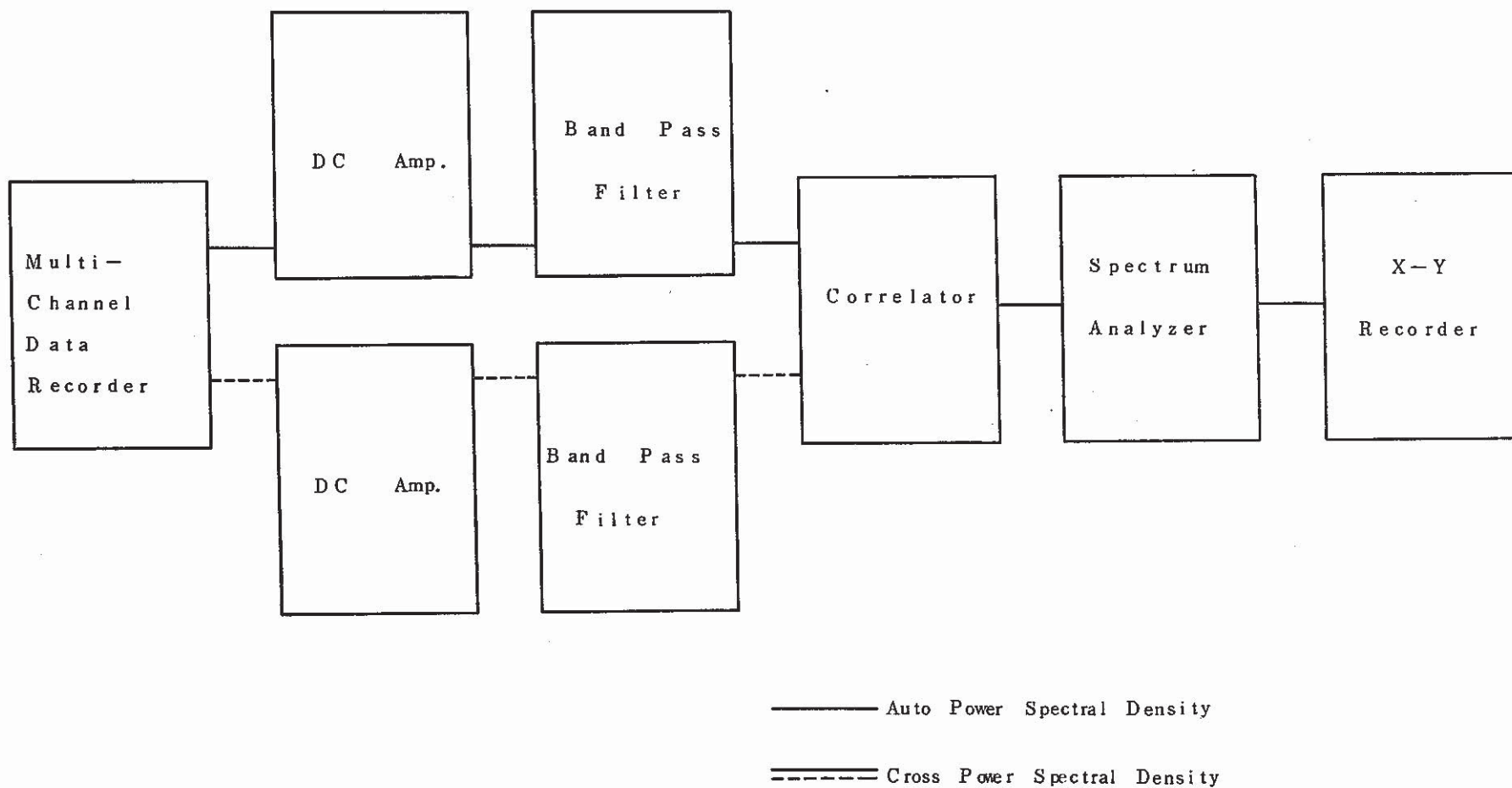


Fig.3.4 Block Diagram of the Frequency Analyzing System

4. 試験結果と考察

4.1 流量変化による影響

1次冷却材流量を20, 50, 100%と変化させた時のRR1およびRR2制御棒駆動機構ハウジング音響信号のrms値をFig. 4.1に示す。このrms値はパワースペクトルの面積の平方根として求めたものである。流量の増加とともにrms値も増加しており、ハウジング音響信号の流量依存性が認められる。A図とB図の縦軸は任意単位であるが、メインアンプゲインに関しては規格化してあるので互いに比較できる。RR1とRR2ではRR2の方がrms値が全体に高目であるが、これにはプリアンプゲインの違い及びビニールテープによる加速度計の取り付けぐあいの違いも含まれている。

これらのrms値に対応するパワースペクトルをFig. 4.4からFig. 4.6に示す。パワースペクトルも流量の増加とともに大きくなっているが、100%流量では400~550Hz成分が顕著に高くなっており、これが衝撃音響の周波数(検出系を含めた固有振動数)に対応する。

ハウジング音響信号のrms変換器出力の1~3Hz成分のrms値と1次冷却材量との関係をFig. 4.2に示す。このrms値もパワースペクトルの1~3Hzの面積の平方根として求めたものである。50%流量時のRR2=350mmのRR2ハウジング音響信号を除けば、rms値は流量の増加とともに増加している。

これらの信号の100%流量でのパワースペクトルをFig. 4.7からFig. 4.9に示す。これらのスペクトルはすべて約2Hzにピークを持っている。これはハウジング音響信号の衝撃音が約2Hzの周期で繰返されていることを示している。

中性子束信号の1~3Hz成分のrms値と1次冷却材流量の関係をFig. 4.3に示す。このrms値もパワースペクトルの1~3Hzの面積の平方根として求めたものである。³He検出器の場合は、50%流量、RR2=350mmの時を除くと、高流量ではrms値が高くなっている。このことにより、中性子束の1~3Hz成分のゆらぎは100%流量に近付くと急速に大きくなることがわかる。CIC検出器の場合も高流量でrms値が高くなっているが、³He検出器ほどは増加していない。これは、CICがグラファイト減速材中にあり、中心燃料集合体頂部近くにある³He検出器に比べて炉心の情報が相対的に減少することによるものである。

これらの信号の100%流量でのパワースペクトルをFig. 4.10からFig. 4.13に示す。これらのスペクトルには、1.7~1.8Hzにピークが見られる。このことから、100%流量では中性子束信号にも約2Hzでゆらぐ成分があり、rms変換音響信号に存在する約2Hzのゆ

らぎ成分と同様な周波数であることがわかる。ハウジング音響信号と中性子束信号の相関は、4・3で述べる。また、20%と50%流量の中性子束信号パワースペクトルには、2Hz付近にはピークは観測できない。

上述のごとく、他のケースと傾向が違うために除いてある50%流量でRR2 = 350mmの場合は、 ^3He 検出器の中性子束信号には数秒周期の大きな変動が時々見られ、これがrms値を大きくしている原因と考えられる。もしこのような低周波の大きなゆらぎがあればCIC検出器でもパワースペクトルの0Hzに近い部分の上昇するはずであるが、そのような傾向は見えないため、この現象は ^3He 中性子検出系の問題と考えられる。

4・2 制御棒位置および制御棒種類による影響

原子炉出力20 kWでRR2を245.7mmから500.0mmまで引き抜いた時の、中性子束(ch9のCIC)、rms変換したRR2ハウジング音響信号およびRR2ロードセル信号ゆらぎの1~3Hz成分のrms値の変化をFig. 4・14に示す。このrms値もパワースペクトルの1~3Hz成分の面積の平方根として求めた。RR2を引抜いた分の補償はTable 3・2に示すごとく4本の安全棒を用いており、補償用制御棒の振動による中性子束への影響を小さくしてある。中性子束のrms値はRR2引抜きとともに低下している。制御棒の振動が一定であれば中性子束のゆらぎは制御棒引抜き位置に対して、制御棒校正曲線に対応して逆S字曲線になると考えられるので、測定結果は妥当である。なお、中性子束rms値において、RR2の制御棒値から考えると上端寄りになるにつれて、より低下(例えばRR2 = 500mmでは約1.0)するはずであるが、そうならないのは、補償用の他の制御棒による影響が含まれているためと考えられる。

ハウジング音響信号ではRR2位置が中央より上端寄りでは、ほぼ一定値に飽和している。これはRR2を引抜くにつれて衝突が多くなり、測定時のデータレコーダ入力レンジが低すぎたため飽和した信号が記録されてしまったことによると考えられる。RR2 = 350mmのrms値が、より大きいものと考えると、ロードセル信号rms値のパターンと類似したものになることからいえる。ロードセル信号rms値では、中心引抜き位置で最大となり、それよりも上端寄り及び下端寄りでは低下している。これより、RR2は中心引抜き位置での振動が大きいものと考えられる。

Fig. 4・15には、以上のrms値測定時の中性子束(ch.9)のパワースペクトルを示す。同様にFig. 4・16にはRR2ロードセル信号のパワースペクトル、Fig. 4・17にはrms変換したRR2ハウジング音響信号のパワースペクトルを示す。これらのスペクトルはすべて約2Hz

にピークがあり、そのピークの周波数はRR2引抜き位置にはよらないことがわかる。これらの信号間の相関については4・3で述べる。

各制御棒を300mm引抜き位置にした時の中性子束(ch.9)のパワースペクトルをFig. 4・18に示す。RR1では約1.7Hz, RR2では約1.9Hz, SRでは4本とも約2.3Hzにピークがあり、SRのピークはRRのより小さい。Fig. 4・19には300mmに引抜かれている制御棒の駆動機構ハウジングに取付けた加速度計からの信号をrms変換した信号のパワースペクトルを示す。RR1では約1.7Hz, RR2では約1.9Hzにピークが見られ、それらの2倍の周波数のところにもピークが見られる。SRでは4本ともピークは見られず、パワースペクトルのレベルも低い。Fig. 4・20には300mmに引抜かれている制御棒のロードセル信号のパワースペクトルを示す。RR1では約1.7Hz, RR2では約1.9Hzにピークが見られ、SR2ではパワースペクトルのレベルが下がって約2.3Hzにピークが見られる。他のSRでは更にレベルが下がっており、SR1では約2.3Hz, SR3とSR4では約2.0Hzにピークが見られる。これらのことよりRRでは1.7から1.9Hz程度の振動成分が主であり、SRでは2.0から2.3Hz程度の振動成分が見られるが、RRに比べて振動は小さく衝撃音は発していないことがわかる。

4・3 信号間の相関(出力50MW時のデータ)

原子炉出力約50MWで調整棒の位置のパターンを4つのパターンに変化させた場合のデータの解析を行う。この4つのパターンはTable 3・3に示す。データ解析にあたっては、測定した反応度信号(反応度計を用いて中性子束信号よりアナログ演算して得られる)、調整棒音響信号および調整棒ロードセル信号の自己パワースペクトル密度(APSD)やコヒーレンス関数による振動効果の解析を行う。なお、ここでの解析で反応度信号を用いるのは制御棒振動効果の解析においては元の中性子束信号と同一視でき、また規格化されていて取扱い易いという理由による。また、この反応度信号の演算に用いる中性子束信号はFig. 2・5中に示した特設ch.9(CIC)の信号である。

(1) 試験番号50MW-1, RR1 = 409.8mm, RR2 = 700.2mm

Fig. 4・21は反応度信号、調整棒音響RMS変換信号および調整棒ロードセル信号のAPSDである。反応度信号のAPSDに約1.8Hzのピークが存在し、それにほぼ対応して、RR1音響およびRR1ロードセル信号のAPSDに約1.7Hzのピークが存在する。一方、RR2音響信号のAPSDには約1.8Hzのピークは存在せず、約0.7Hzにピークが存在している。調整棒の挿入長さが大きいほど、すなわち炉心への中性子吸収材の挿入長さが大

きいほど調整棒振動が反応度ゆらぎに与える影響は大きいので、この調整棒位置のパターン（RR1挿入，RR2全引抜）の場合には制御棒振動効果による反応度ゆらぎの内，RR1の振動が寄与する割合は大きく，RR2の振動が寄与する割合は小さいと考えられる。

このことを確認するために反応度信号と各調整棒音響信号間のコヒーレンス関数を計算し Fig. 4・22に示す。コヒーレンス関数はふたつの信号の各周波数成分間の相関係数の2乗に相当するものであり，各信号の自己パワースペクトル密度と信号間の相互パワースペクトル密度より計算される。この場合，反応度ゆらぎが調整棒振動に影響を及ぼすことはないので，このコヒーレンス関数は各調整棒振動が反応度ゆらぎに影響する割合を示す。Fig. 4・22より，以下のことが判る。

RR1振動が反応度ゆらぎに影響する割合が大きい周波数帯域は1.8～2.5Hzであり，RR2振動が反応度ゆらぎに影響する割合が大きい周波数帯域は1.6Hz付近以外ほとんどない。このことは，調整棒位置のパターン（RR1挿入，RR2全引抜）と良い対応を示している。反応度信号とRR1音響信号のコヒーレンシがそれほど大きくない（0.1程度）のは，RR1音響信号に外来雑音が混入しているためと考えられる。またFig. 4・21のRR2音響信号APSDの約0.7Hzのピークでは，この周波数における反応度信号とRR2音響信号のコヒーレンシが小さいことから，約0.7HzのRR2の振動は反応度ゆらぎにはほとんど寄与していないと考えられる。

(2) 試験番号 50MW-2，RR1 = 700.1mm，RR2 = 410.9mm

Fig. 4・23は各信号のAPSDである。反応度信号のAPSDに約0.6Hzと約2.0Hzの顕著なピークが存在する。RR1音響信号のAPSDには顕著なピークが存在しないが，RR1ロードセル信号には約1.6Hzにピークが存在する。この原因は不明であるが，RR1音響信号に外来雑音成分が多いことも原因の一つに上げられる。RR2音響信号とRR2ロードセル信号には約2.0Hzのピークがともに存在し，反応度信号の約2.0Hzのピークと対応する。

Fig. 4・24は，反応度信号と各調整棒音響信号間のコヒーレンス関数である。RR2振動が反応度ゆらぎに影響する割合が大きい周波数帯域は1.8～2.1Hzであり，RR1振動が反応度ゆらぎに影響する割合が大きい周波数帯域は，ほとんどない。このことは調整棒位置のパターン（RR1全引抜，RR2挿入）と良い対応を示している。また，反応度信号のAPSDに存在する約0.6Hzのピークについて，この周波数での反応度信号と各調整棒音響信号間のコヒーレンシが小さいことから，次の2つの原因が考えられる。

1. 調整棒振動以外の原因による約 0.6Hz の反応度ゆらぎ存在する。
2. 調整棒音響測定装置では測定できない約 0.6Hz の調整棒振動が存在する。この音響測定装置は主に調整棒と下部案内管の衝突音を検出しているため、約 0.6Hz の調整棒振動においては、この衝突は発生していないことになる。

上述の「1.」の調整棒振動以外の原因は現在のところ想定できないため、反応度ゆらぎにおける約 0.6Hz のピークは「2.」が原因と考えられる。このことについては、5章で再び検討する。

(3) 試験番号 50MW-3, $RR1 = RR2 = 511.1\text{mm}$

Fig. 4-25 は各信号の APSD である。反応信号の APSD には約 0.6Hz と約 1.7Hz に顕著なピークが存在する。RR1, RR2 音響および RR1 ロードセル信号の APSD には、反応度信号のピークに対応した約 1.7Hz の顕著なピークが存在する。RR2 ロードセル信号には顕著なピークは存在しないが、これは RR2 ロードセル検出器の調整棒振動に対する感度が良くないためと考えられる。

Fig. 4-26 は反応度信号と各調整棒音響信号間のコヒーレンス関数である。RR1 振動が反応度ゆらぎに影響する度合いが大きい周波数帯域は 1.6 ~ 1.8Hz であり、RR2 振動が反応度ゆらぎに影響する度合いが大きい周波数帯域は 1.5 ~ 1.7Hz および 2.0 ~ 2.1Hz である。また、反応度信号の APSD の約 0.6Hz のピークは、上述の試験番号 50MW-2 の場合と同様に、この周波数での反応度信号と各調整棒音響信号間のコヒーレンスが小さいことから、この約 0.6Hz のピークは上述の「2.」が原因と考えられる。

Fig. 4-27 は反応度信号と各調整棒ロードセル信号間のコヒーレンス関数である。この図から Fig. 4-26 の場合と同様に、RR1 振動が反応度ゆらぎに影響する度合いが大きい周波数帯域は 1.3 ~ 1.5Hz および 1.6 ~ 1.8Hz であり、RR2 振動が反応度ゆらぎに影響する度合いが大きい周波数帯域は 2.0 ~ 2.1Hz であることが判る。この結果は Fig. 4-26 の場合とほぼ同様であることから、制御棒振動の解析または監視にロードセル信号を用いても良いことが判る。

また、Fig. 4-26 (または Fig. 4-27) のコヒーレンス関数の解析の結果、反応度ゆらぎの大きな 1.6 ~ 2.1Hz の周波数帯域において、影響する度合いが大きい周波数帯域は RR1 の振動と RR2 の振動で多少違いますが (RR1 : 1.6 ~ 1.8Hz, RR2 : 1.5 ~ 1.7Hz および 2.0 ~ 2.1Hz), 1.6 ~ 2.1Hz の帯域全体を考えると、RR1 振動が反応度ゆらぎに影響する割合と RR2 振動が影響する割合はほぼ同程度であると判る。このことは、

調整棒位置のパターン（RR1，RR2 同位置挿入）と良い対応を示している。

(4) 試験番号 50MW-4，RR1 = 470.0mm，RR2 = 558.4mm

Fig. 4・28 は各信号のAPSDである。反応度信号のAPSDには約 1.8Hz に顕著なピークが存在する。RR1 の音響信号およびロードセル信号には 1.6～1.9Hz 付近に顕著なピークが存在するが、RR2 の音響信号およびロードセル信号には顕著なピークは存在しない。Fig. 4・29 は反応度信号と各調整棒音響信号間のコヒーレンス関数である。RR1 振動が反応度ゆらぎに影響する度合いが大きい周波数帯域は 1.3～1.4Hz と 1.8～2.1Hz であり RR2 振動が反応度ゆらぎに影響する度合いが大きい周波数帯域は 1.9～2.3Hz である。これより、反応度ゆらぎの大きな 1.7～1.9Hz の周波数帯域においては RR1 の振動が反応度ゆらぎに影響する度合いは大きく、RR2 の振動が影響する度合いはほとんどないことが判る。これについて 2 つの事が考えられる。これは、まず RR1 の挿入長さが RR2 より大きいこと、つぎに RR2 の音響信号の APSD に顕著なピークが見られないことから RR2 振動自体が小さかったと推察できることである。上述の現象はこれらの 2 つの原因が複合して起ったと考えられる。

以上、原子炉出力約 50MW で調整棒の位置パターンを 4 つのパターンに変化させた場合のデータの解析を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 反応度の 1.6～2.0Hz のゆらぎはほぼ調整棒振動効果によるものであることが明らかになった。
- (2) 反応度ゆらぎの APSD に約 0.6Hz のピークが存在する場合がある。このピークの要因は現在不明であるが、このピークは音響信号に表われない約 0.6Hz の調整棒振動、すなわち調整棒と下部案内管の衝突を伴わない調整棒振動の存在が要因であると推論される。
- (3) 調整棒 1（RR1）の振動が反応度ゆらぎに影響を与える度合いと調整棒 2（RR2）の振動が影響を与える度合いの相対的な関係は反応度信号と音響信号間のコヒーレンス関数によりほぼ把握できることが判った。このことは、このコヒーレンス関数と調整棒位置のパターンが良い対応を示していることにより確認された。

4・4 反応度ゆらぎの RMS 値

Fig. 4・30 は RR1 の引抜位置を固定にし RR2 を階段状に引き抜くことにより原子炉出力を階段状に上昇させ、各出力における反応度信号を測定し、反応度信号の APSD を解析し、調整棒振動効果のある周波数帯域（0.1～5Hz）の RMS 値を計算した結果である。図中には反

応度信号のAPSDにおけるピーク周波数も示す。

Fig. 4.30 より以下のことが判る。

- (1) 定格出力 50MW時には調整棒振動による反応度ゆらぎのRMS値は約 0.125 ρ であって原子炉制御にはほとんど外乱を与えない。
- (2) 出力上昇にともない反応度ゆらぎのRMS値は減少する。この場合調整棒振動の大きさには変化がないと考えられるので、これは調整棒の挿入長さが大きいほど、すなわち炉心への中性子吸収材の挿入長さが大きいほど調整棒振動が反応度ゆらぎに与える影響は大きいことを示している。
- (3) 調整棒の挿入長さが変化しても振動効果による反応度ゆらぎのピーク周波数はほとんど変化しない。これより調整棒振動の振動数はほとんど変化しないことが判る。

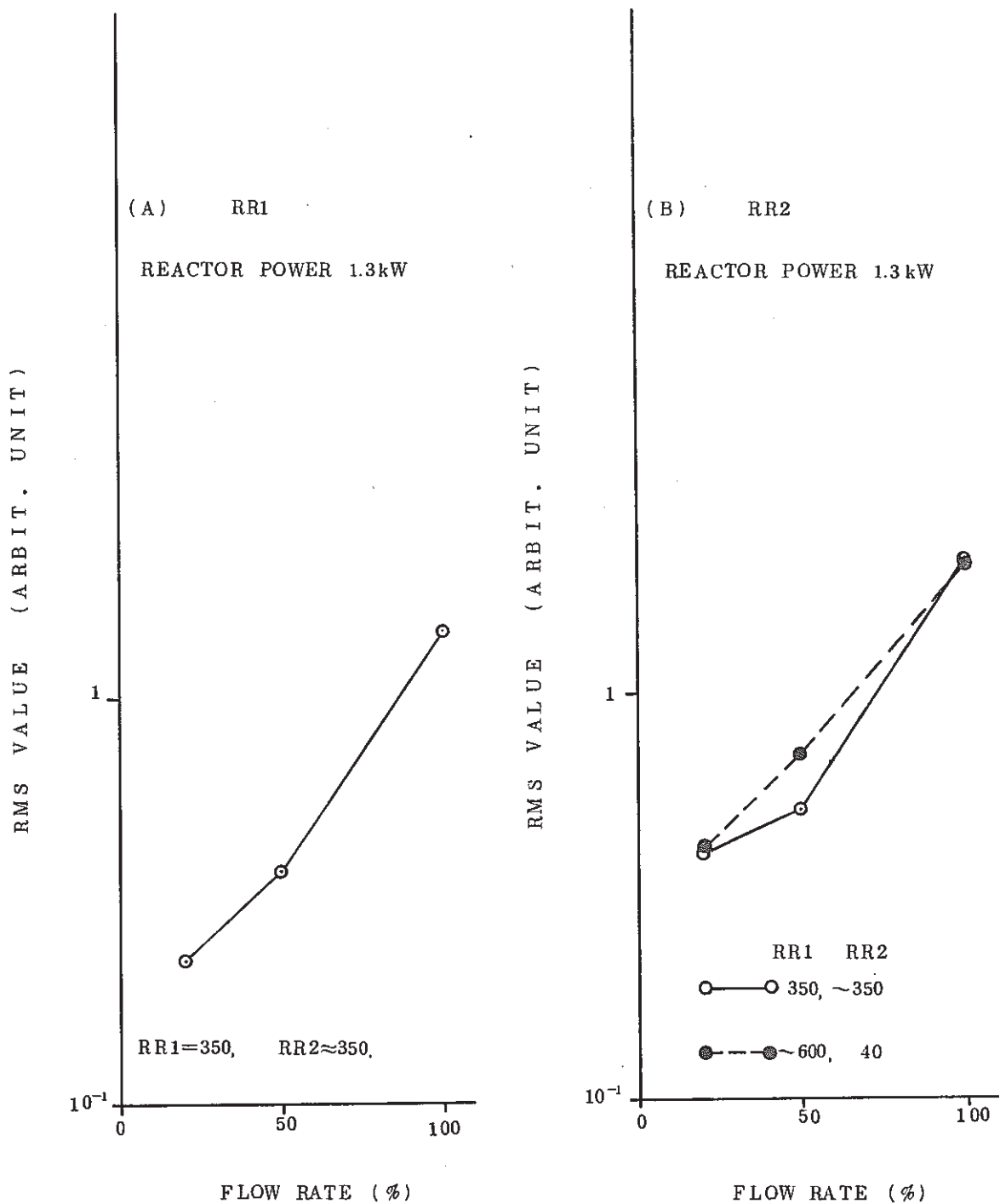


Fig.4.1 Rms values of 0 ~ 1.5kHz component of CRD housing acoustic signal vs. primary flow rate ; (A) RR1, (B) RR2

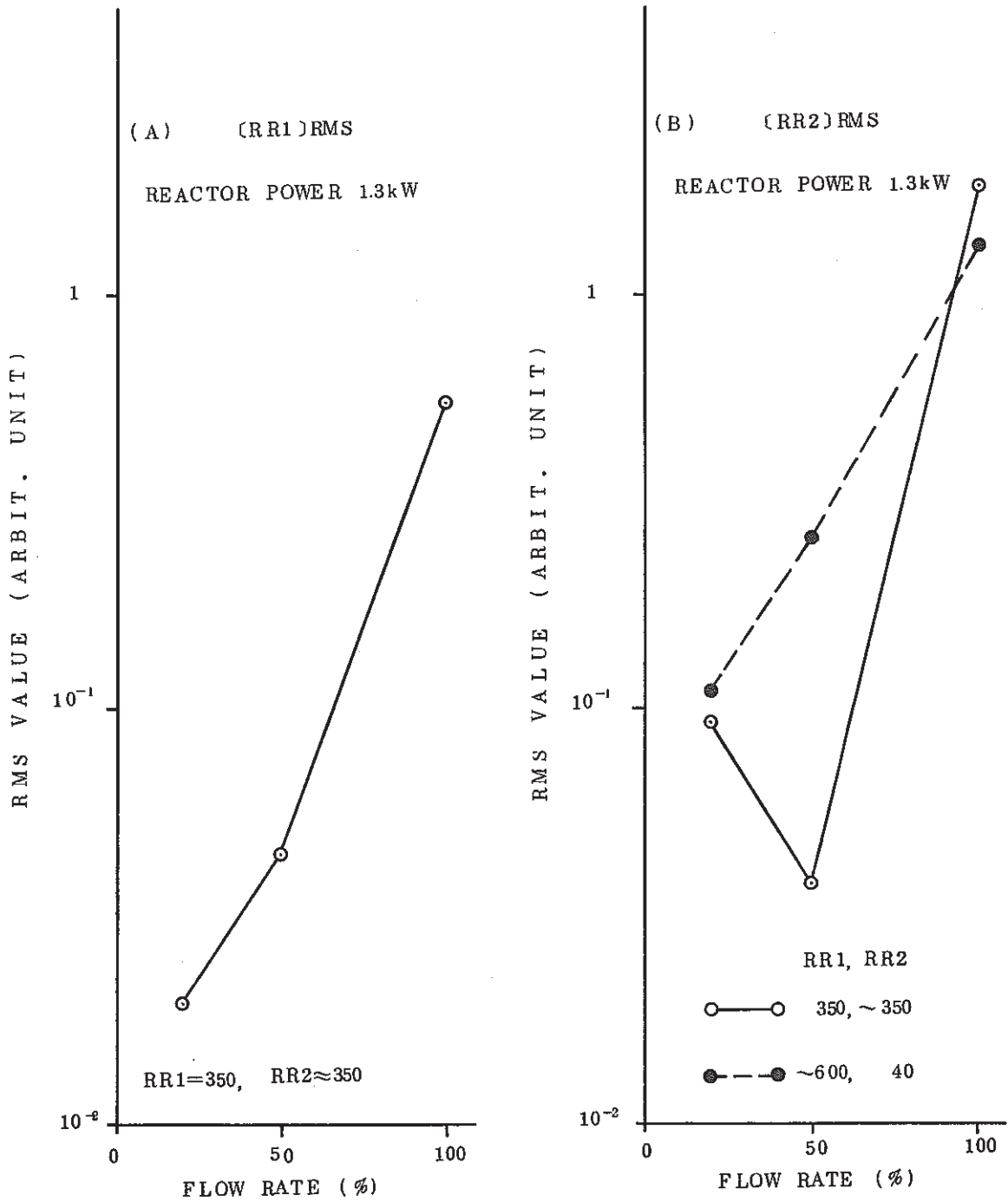


Fig.4.2 Rms values of 1 ~ 3Hz component of rms converted CRD housing acoustic signals vs. primary flow rate ; (A) RR1, (B) RR2

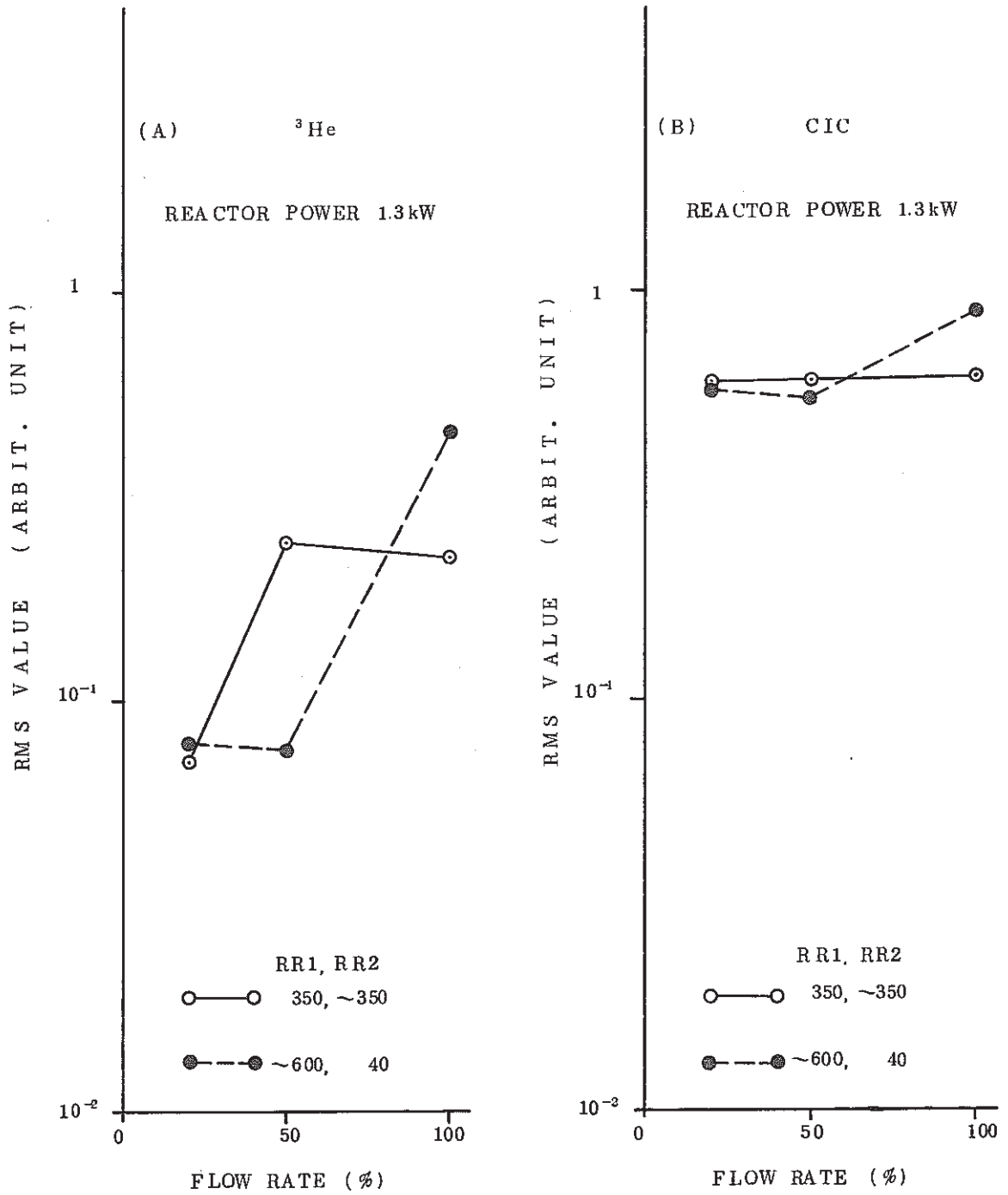


Fig.4.3 Rms values of 1 ~ 3Hz component of neutron flux vs. primary flow rate ;
 (A) ^3He , (B) CIC

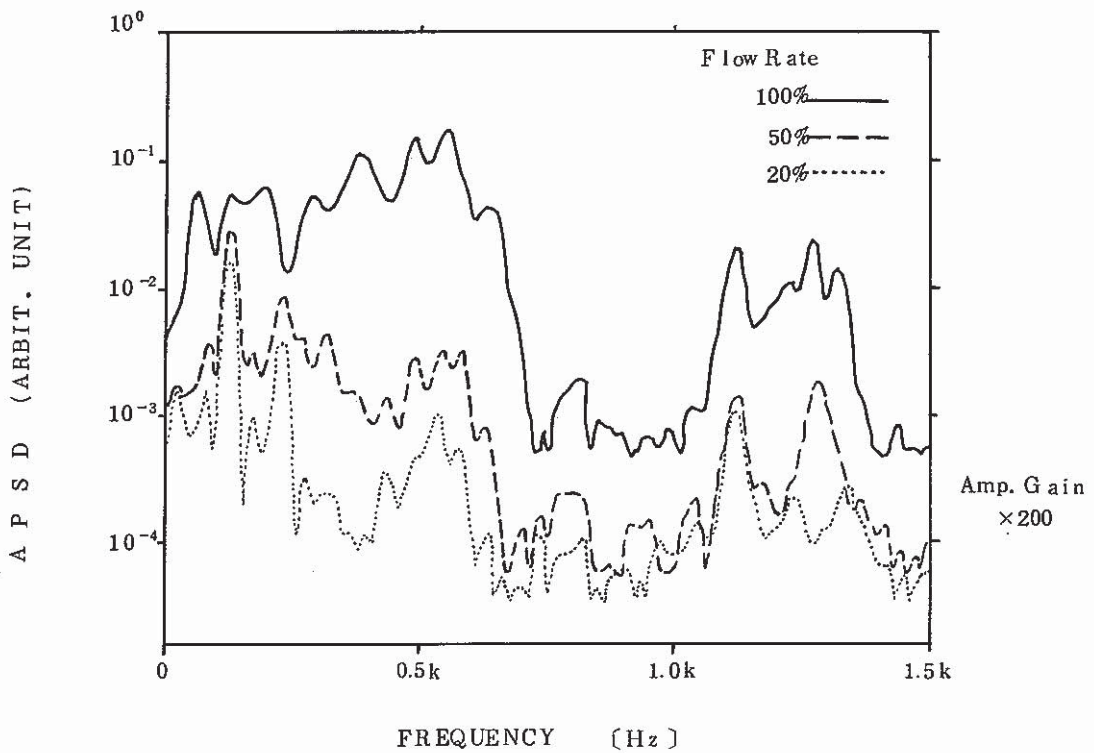


Fig.4.4 Auto power spectral densities of [RR1] housing acoustic signal ;
1.3kW, RR1 = 350mm, RR2 ≈ 350mm

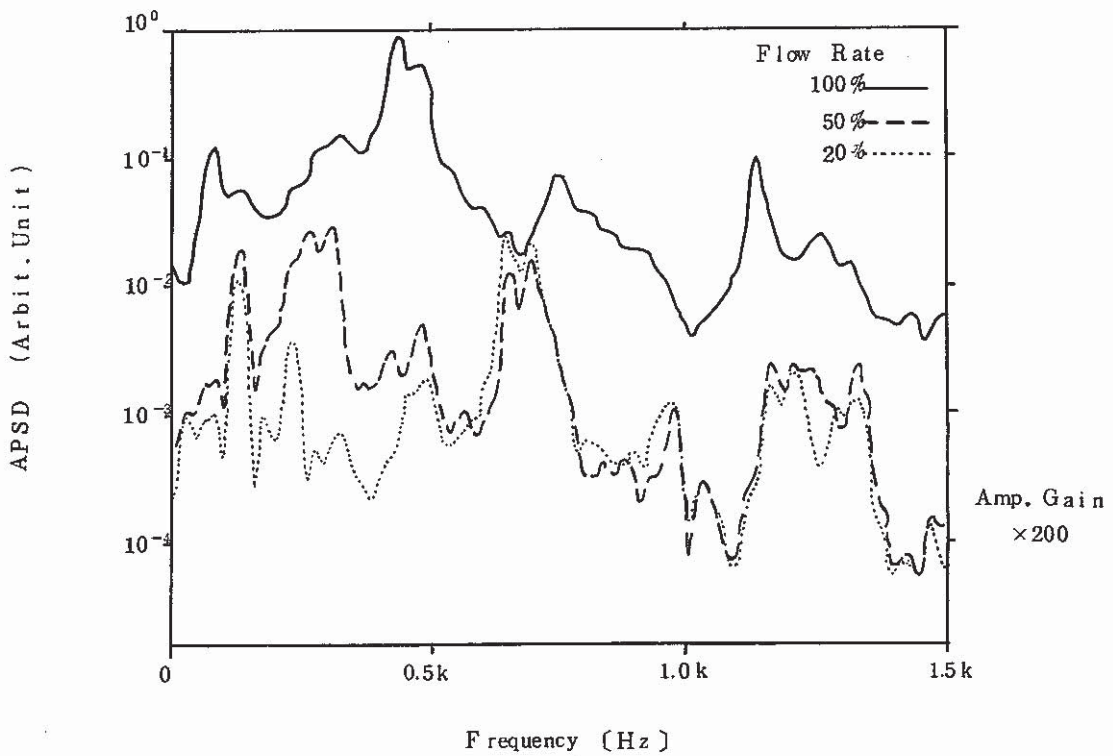


Fig.4.5 Auto power spectral densities of [RR2] housing acoustic signal ;
1.3kW, RR1 = 350mm, RR2 ≈ 350mm

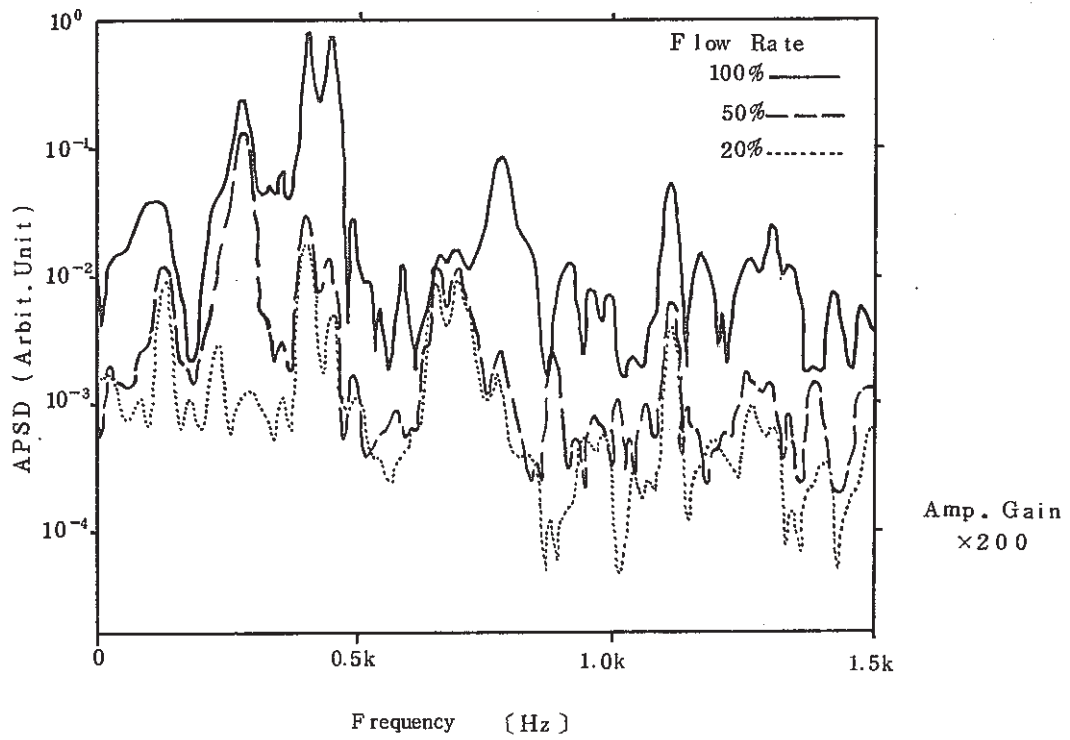


Fig.4.6 Auto power spectral densities of [RR2] housing acoustic signal ;
1.3kW, RR1 ≈ 600mm, RR2= 40mm

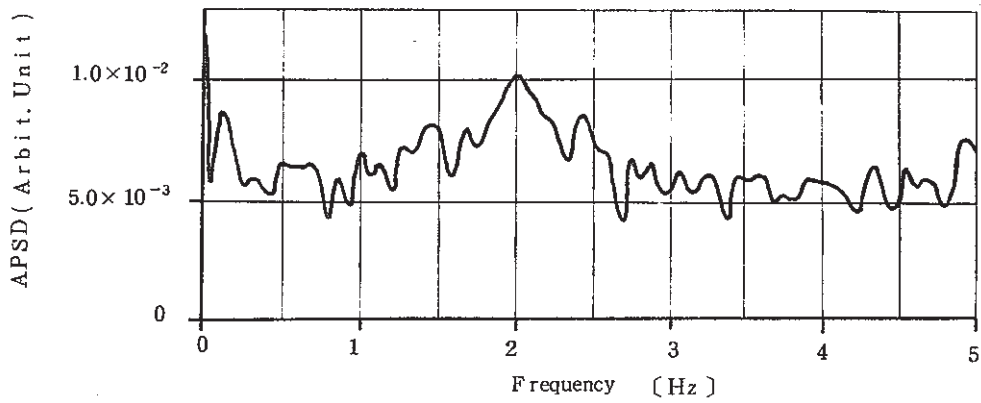


Fig.4.7 Auto power spectral density of the fluctuation of RMS converted [RR1] housing acoustic signal ; RR1=350, RR2≈350, 100% flow, 1.3kW

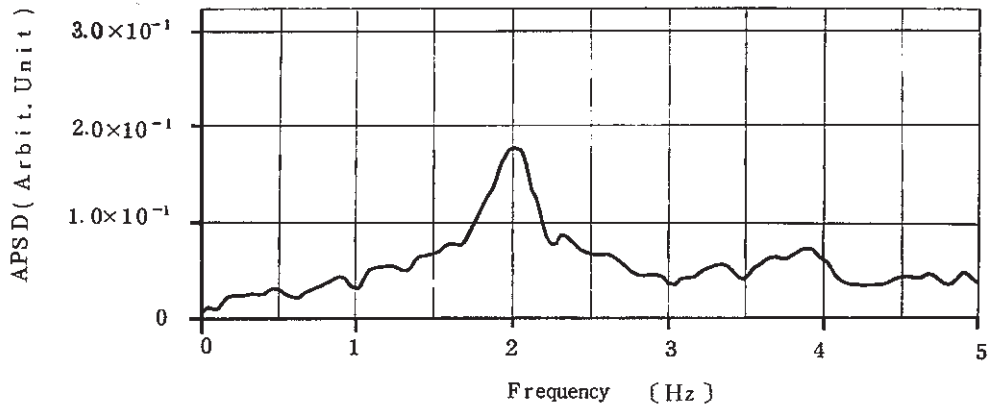


Fig.4.8 Auto power spectral density of the fluctuation of RMS converted [RR2] housing acoustic signal ; RR1=350, RR2≈350, 100% flow, 1.3kW

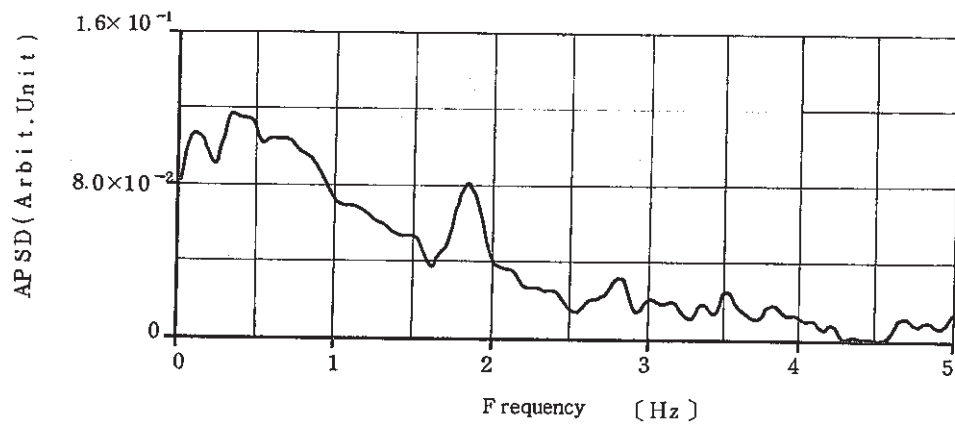


Fig.4.9 Auto power spectral density of the fluctuation of RMS converted [RR2] housing acoustic signal ; RR1≈600, RR2=40, 100% flow, 1.3kW

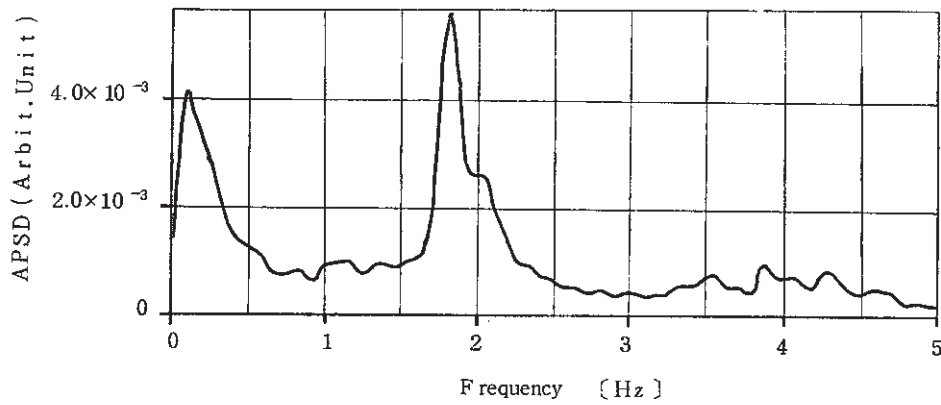


Fig. 4.10 Auto power spectral density of the fluctuation of neutron flux (^3He)
; RR1=350, RR2≈350, 100% flow, 1.3kW

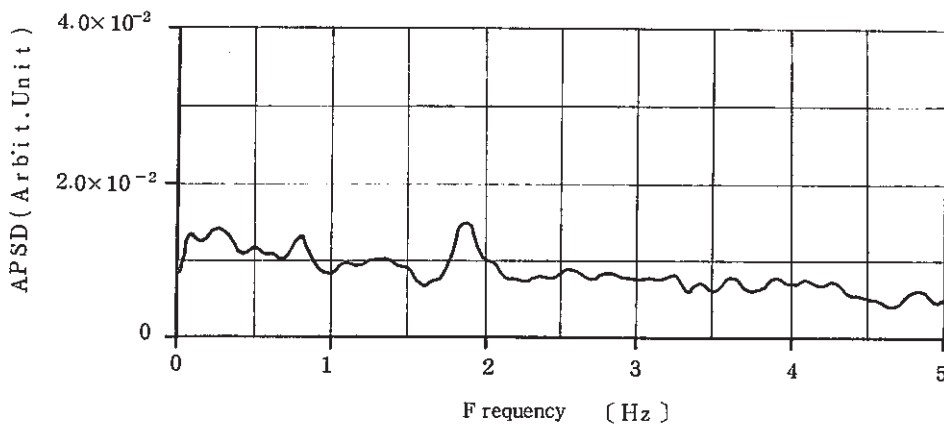


Fig.4.11 Auto power spectral density of the fluctuation of neutron flux (CIC ch.9)
; RR1=350, RR2≈350, 100%flow, 1.3kW

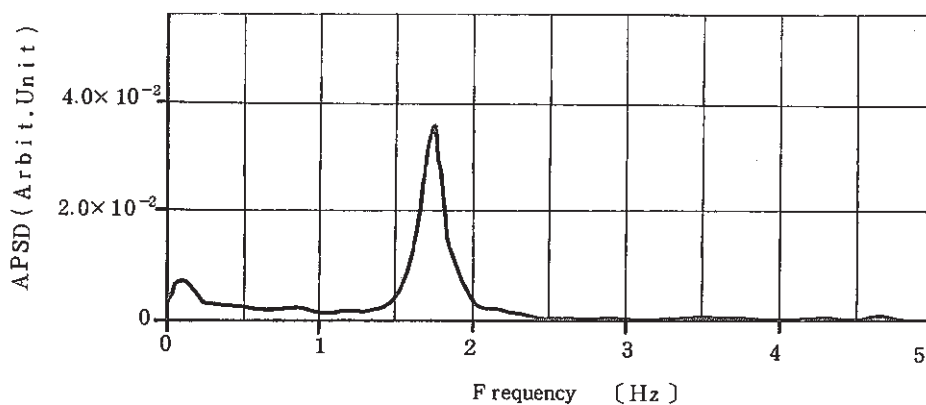


Fig.4.12 Auto power spectral density of the fluctuation of neutron flux (^3He)
; RR1 \approx 600, RR2 = 40, 100%flow, 1.3kW

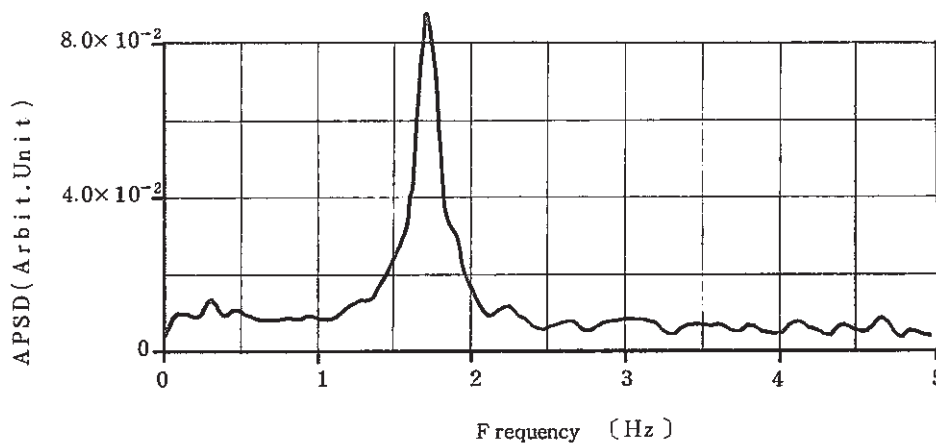


Fig.4.13 Auto power spectral density of the fluctuation of neutron flux
(CIC ch.9)
; RR1 \approx 600, RR2 =40, 100% flow, 1.3kW)

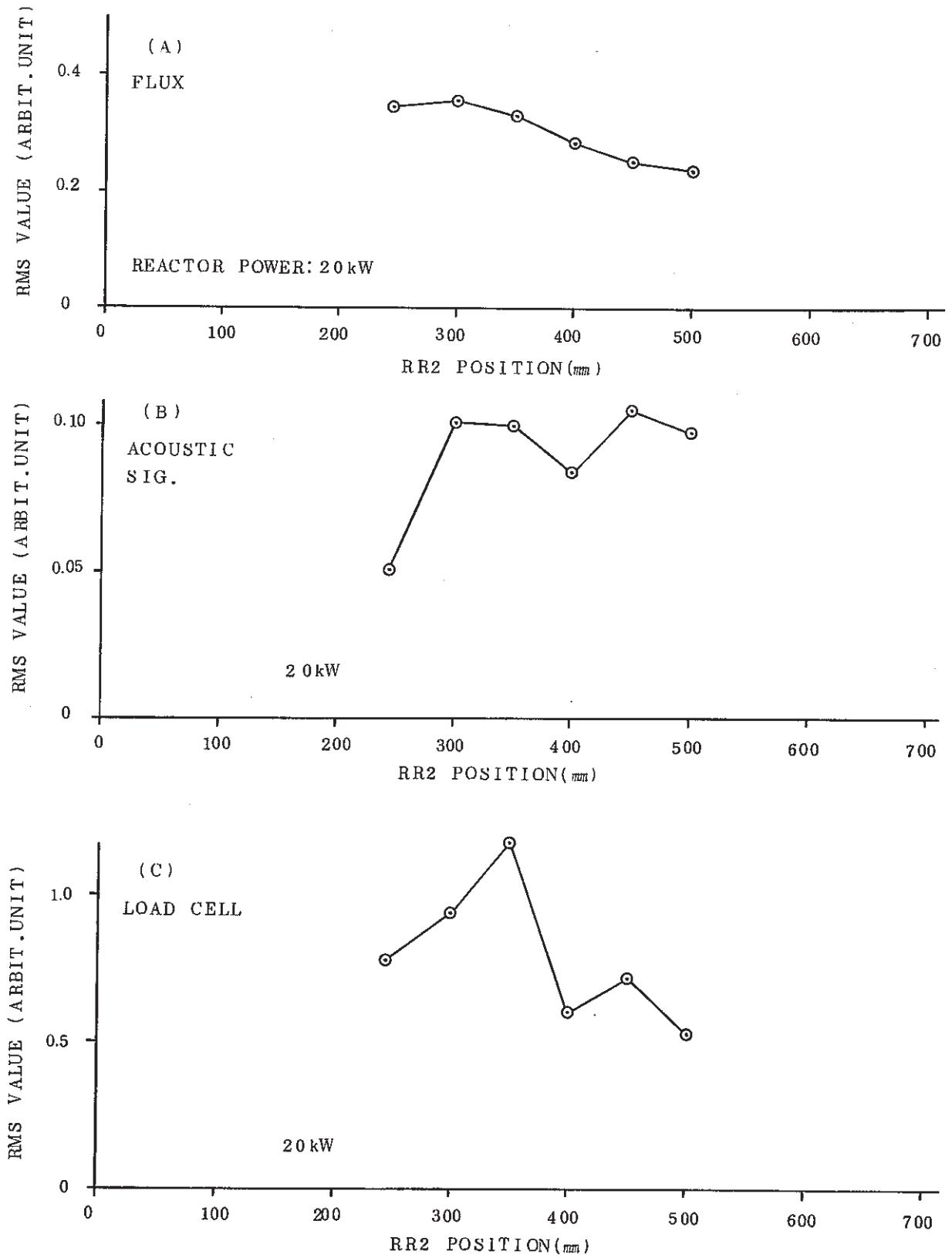


Fig.4.14 Rms values of 1~3Hz component of neutron flux (ch.9), rms converted RR2 housing acoustic signal, and RR2 load-cell signal vs. RR2 withdrawn position

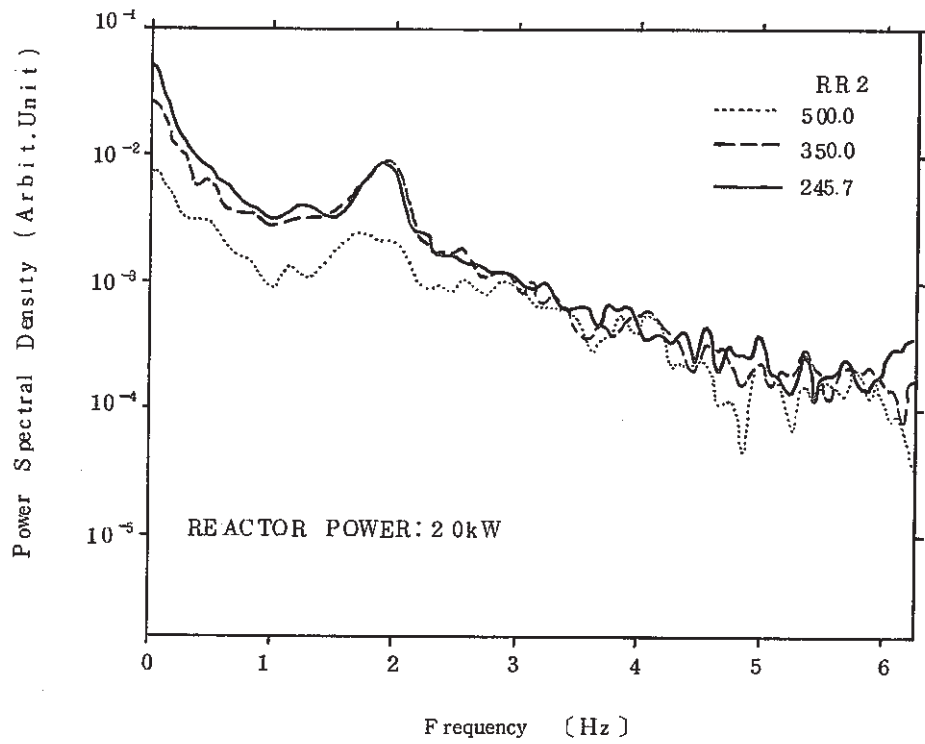


Fig.4.15 Auto power spectral density of neutron flux (ch.9)

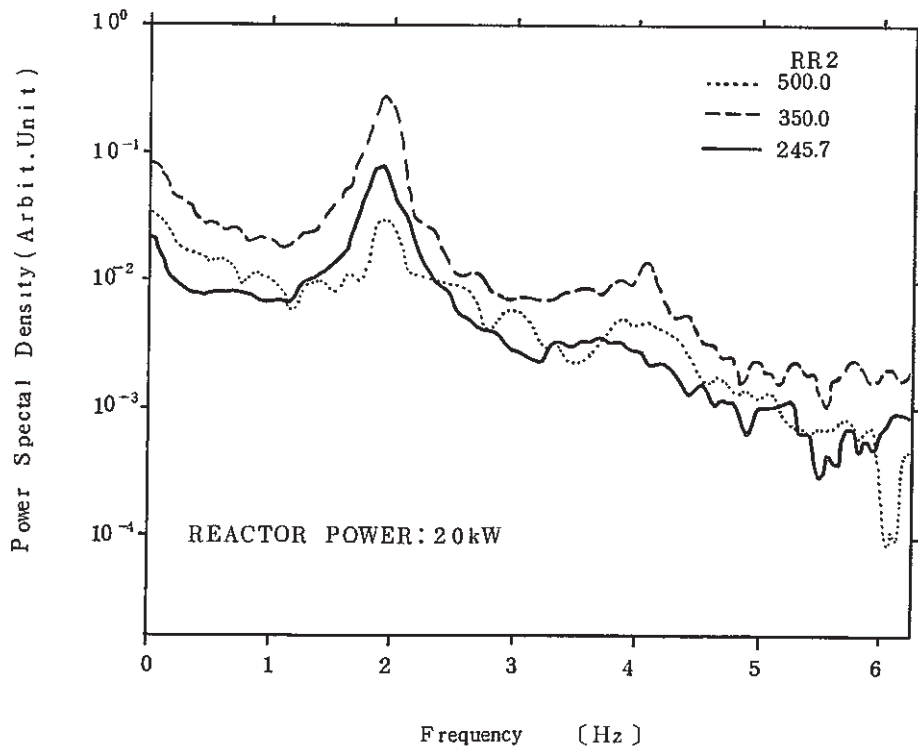


Fig.4.16 Auto power spectral density of [RR2] load-cell signal

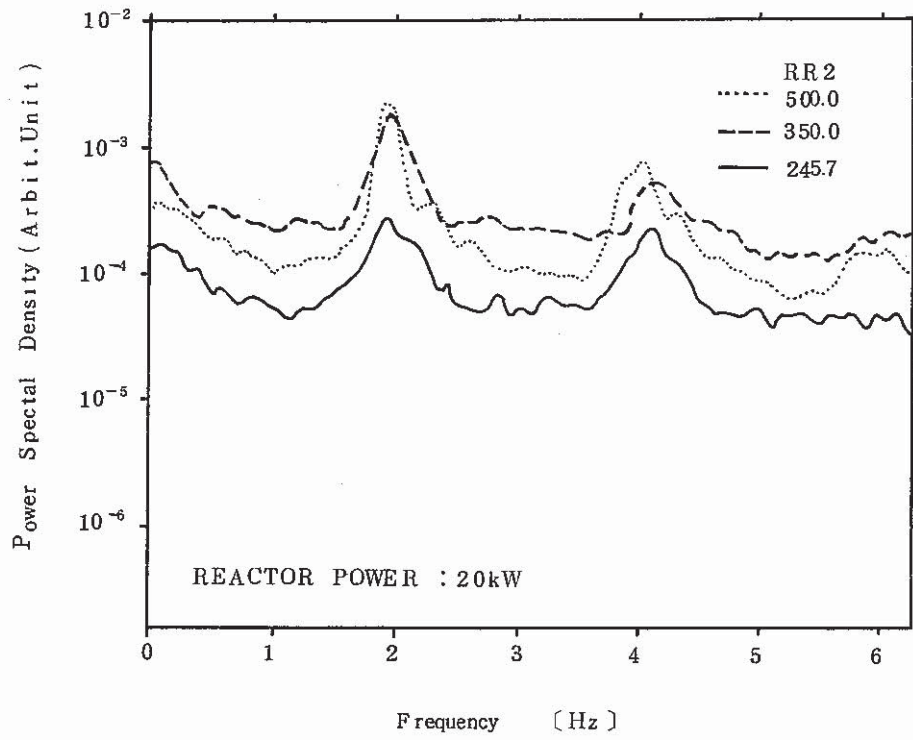


Fig.4.17 Auto power spectral density of rms converted [RR2] housing acoustic signal

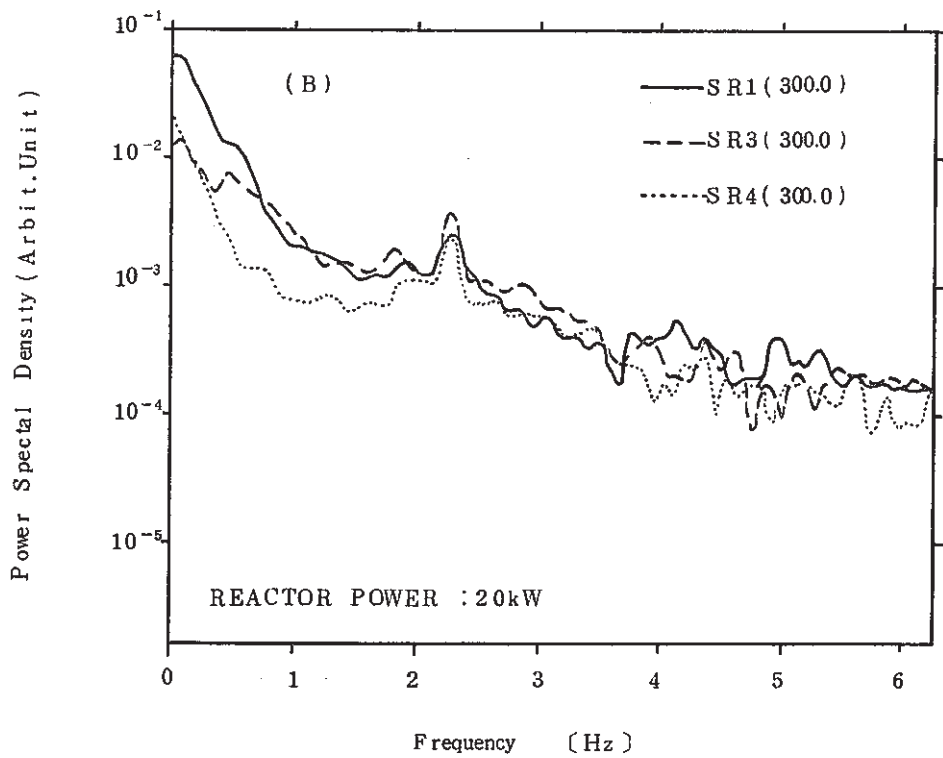
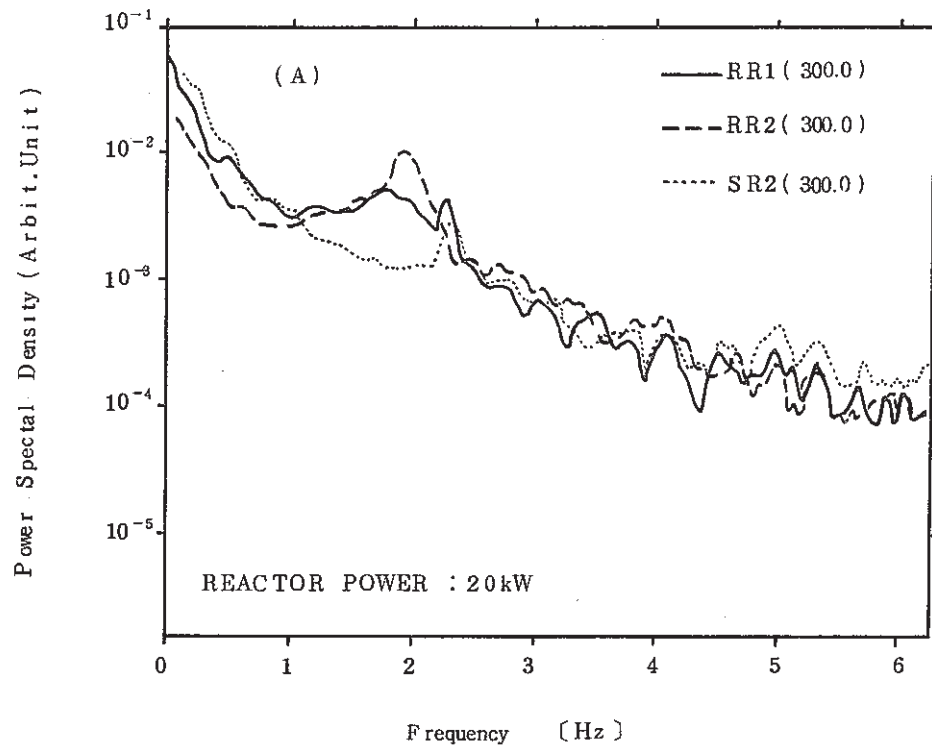


Fig.4.18 Auto power spectral density of neutron flux (ch.9)

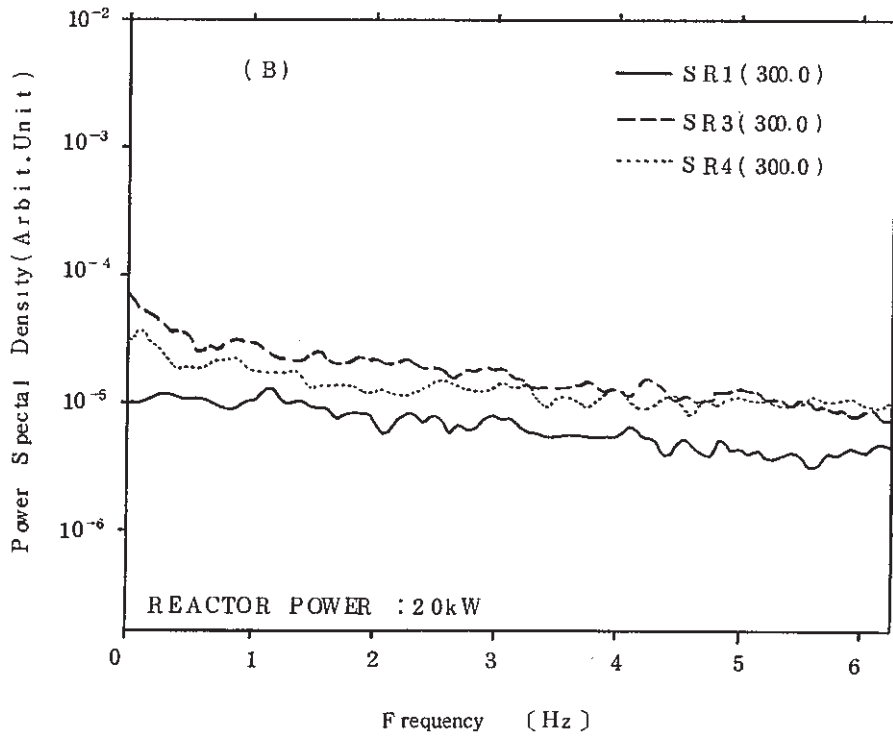
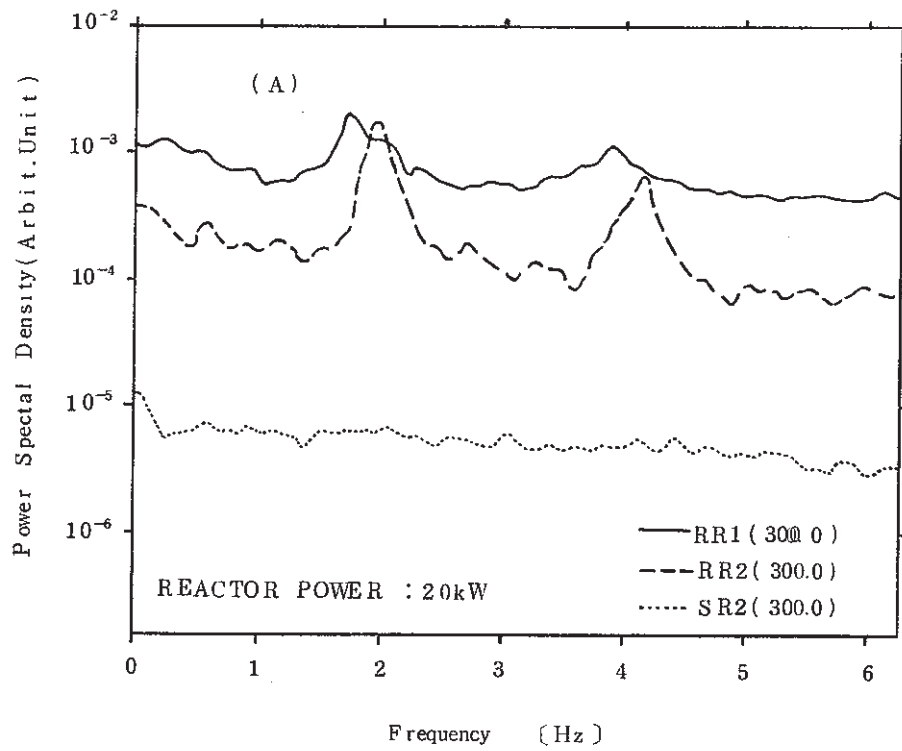


Fig. 4.19 Auto power spectral density of rms converted CRD housing acoustic signals

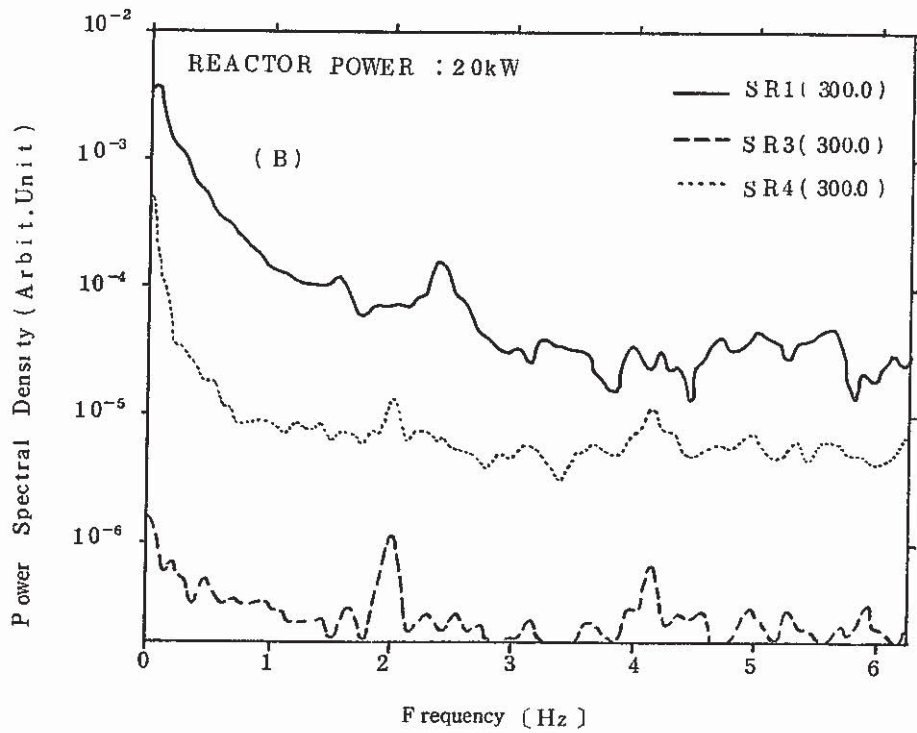
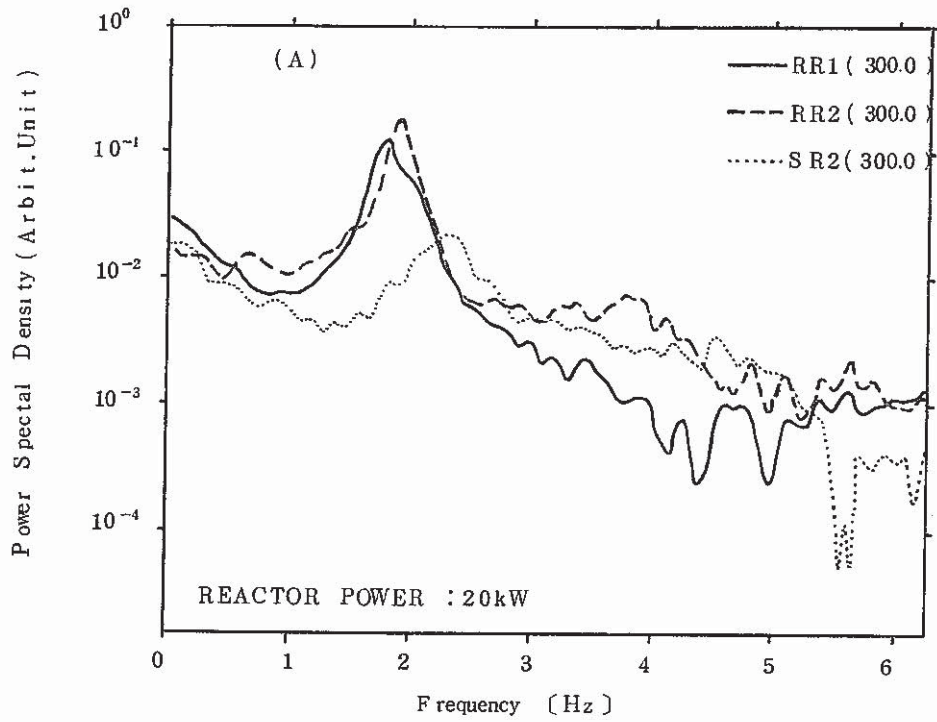


Fig.4.20 Auto power spectral density of load-cell signals

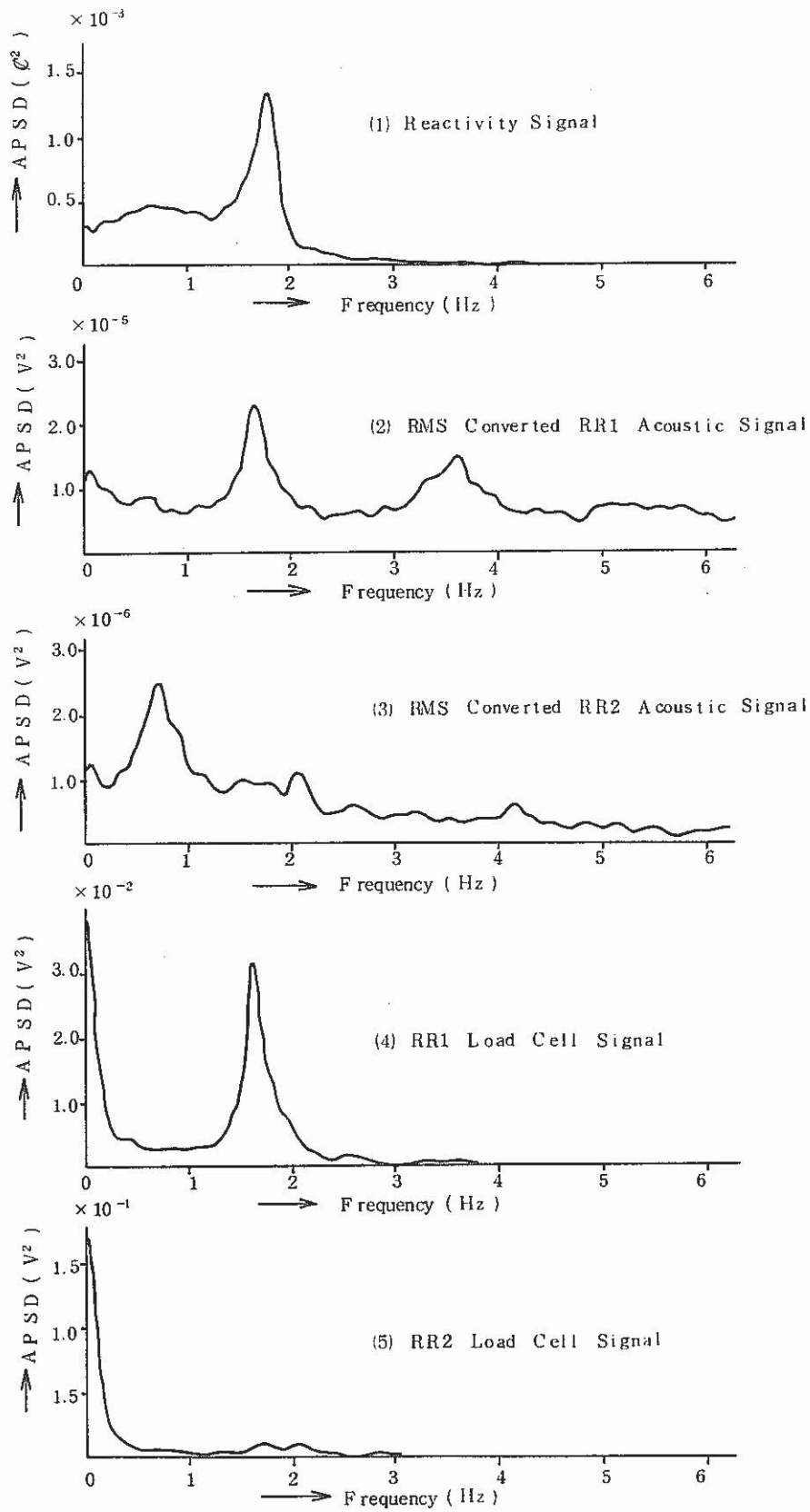


Fig.4.21 APSDs of Reactivity Signal, Acoustic Signals, and Load Cell Signals
(Test No. 50MW-1, RR1=409.8mm, RR2=700.2mm)

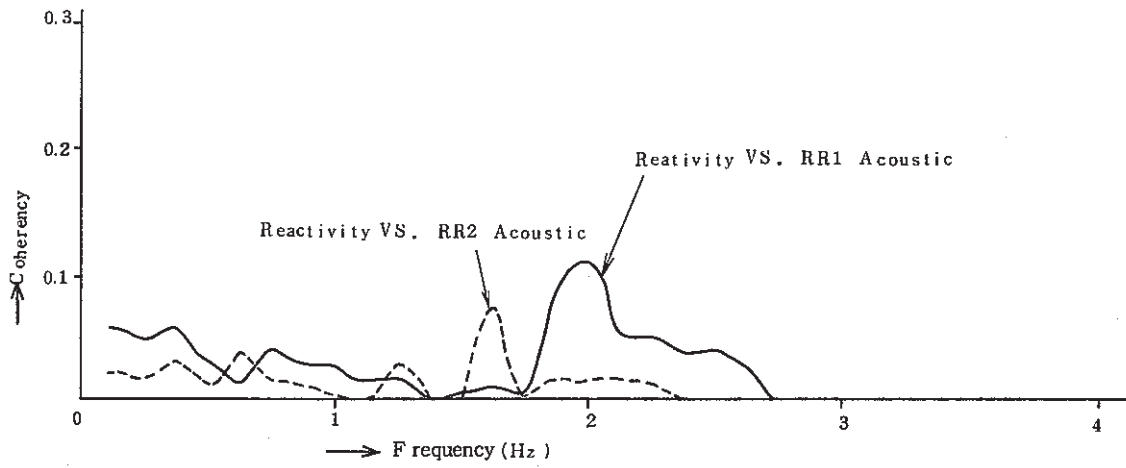


Fig.4.22 Coherence Functions between Reactivity Signal and RR1, RR2 Acoustic Signals (Test No. 50MW-1, RR1=409.8mm, RR2=700.2mm)

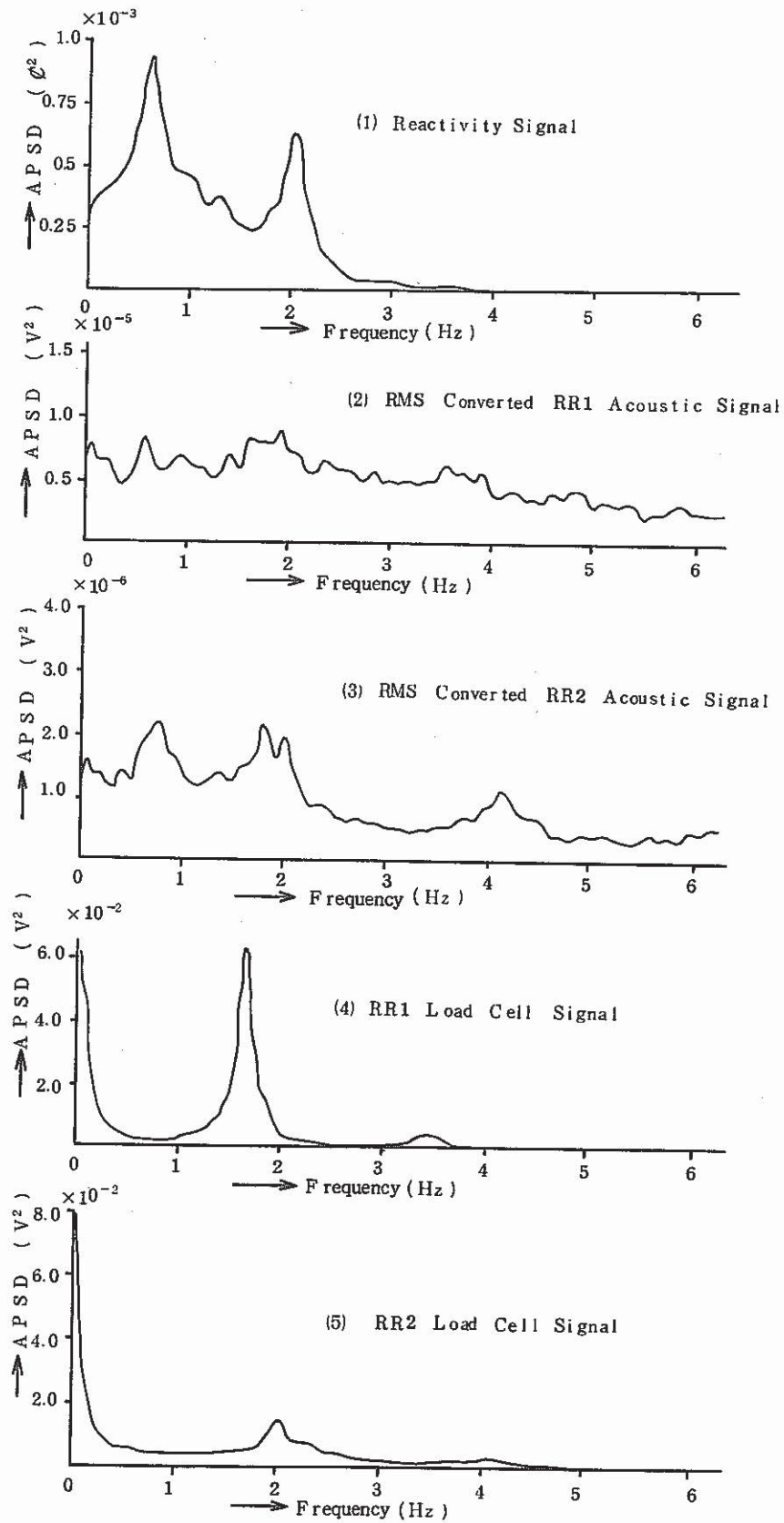


Fig.4.23 APSDs of Reactivity Signal, Acoustic Signals, and Load Cell Signals
 (Test No.50MW-2, RR1=700.1mm, RR2=410.9mm)

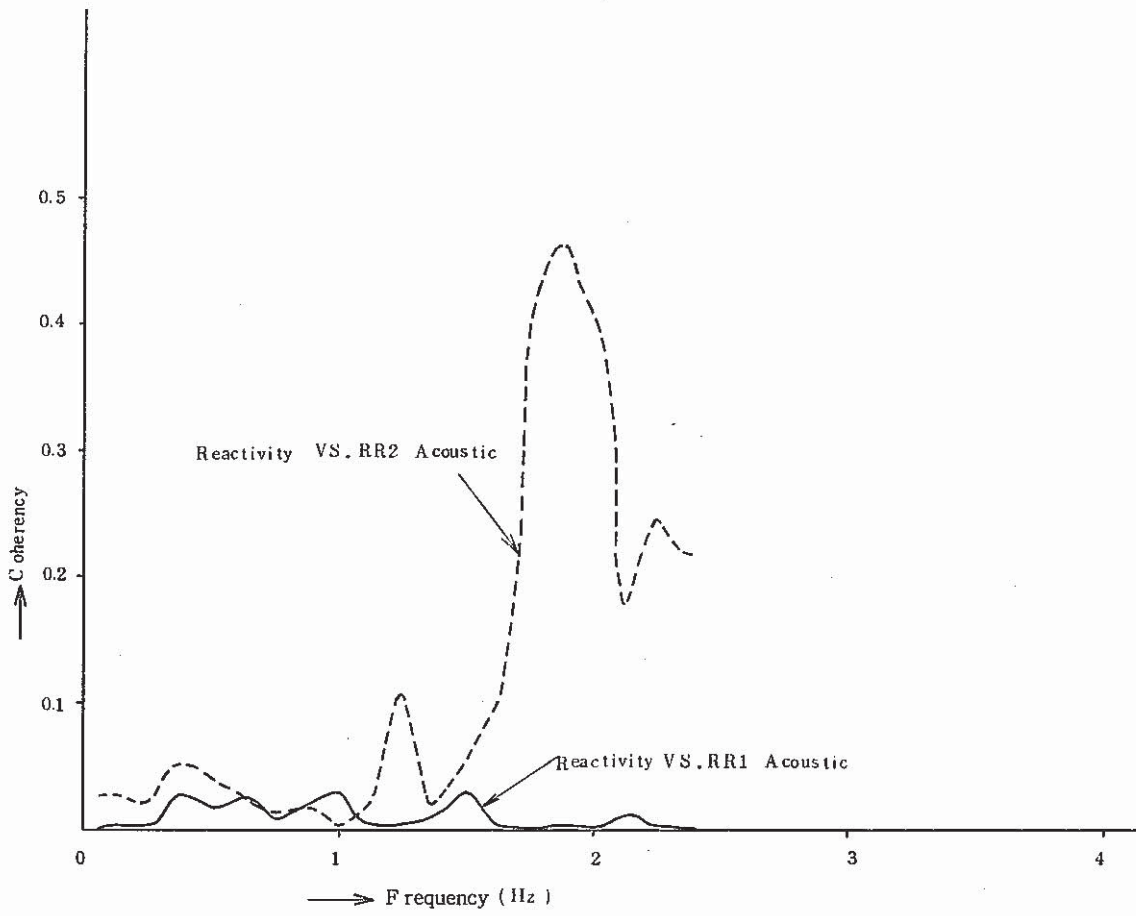


Fig.4.24 Coherence Functions between Reactivity Signal and RR1, RR2 Acoustic Signals (Test No. 50MW-2, RR1=700.1mm, RR2=410.9mm)

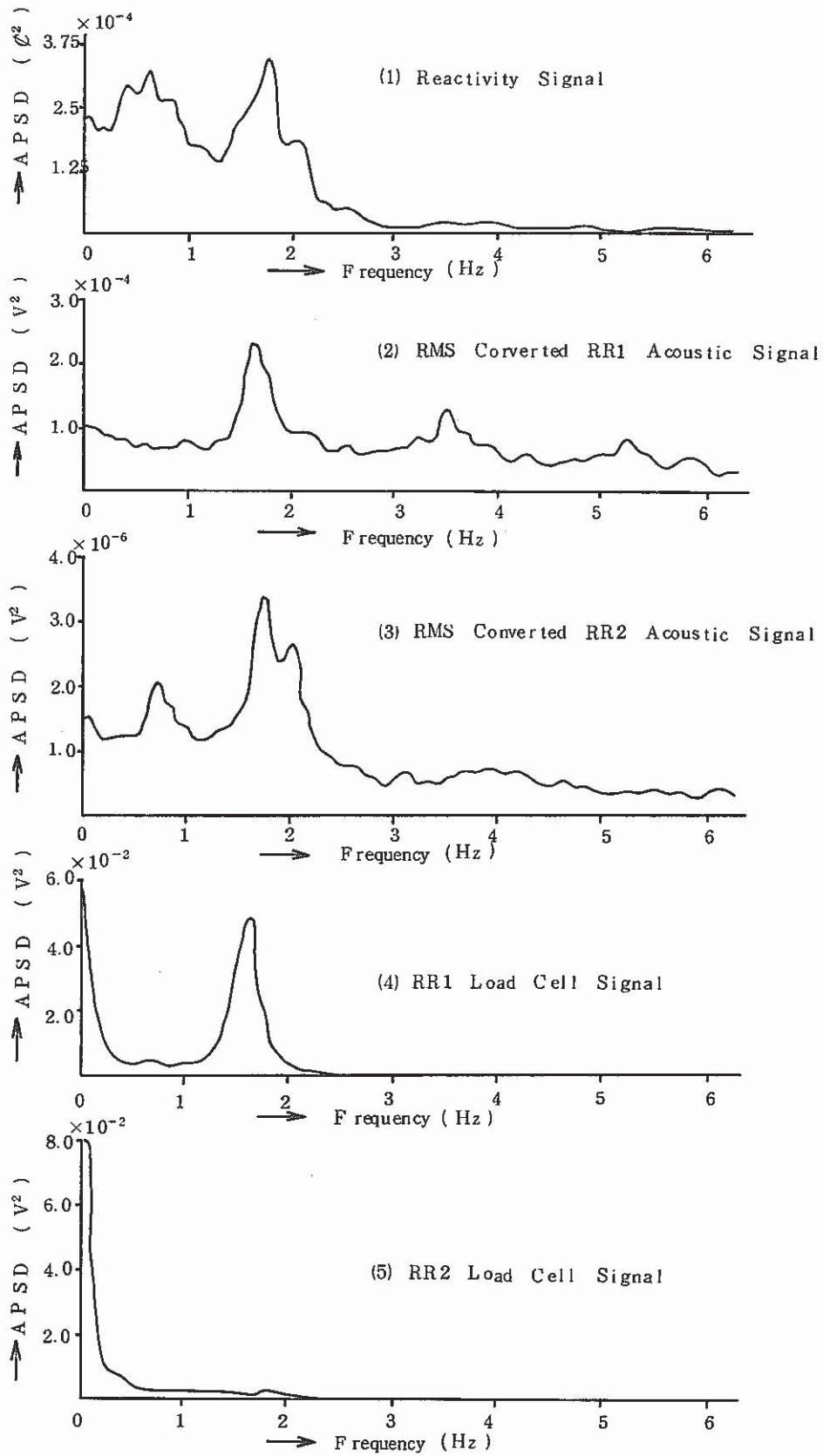


Fig.4.25 APSDs of Reactivity Signal, Acoustic Signals and Load Cell Signals
(Test No. 50MW-3, RR1=RR2=511.1mm)

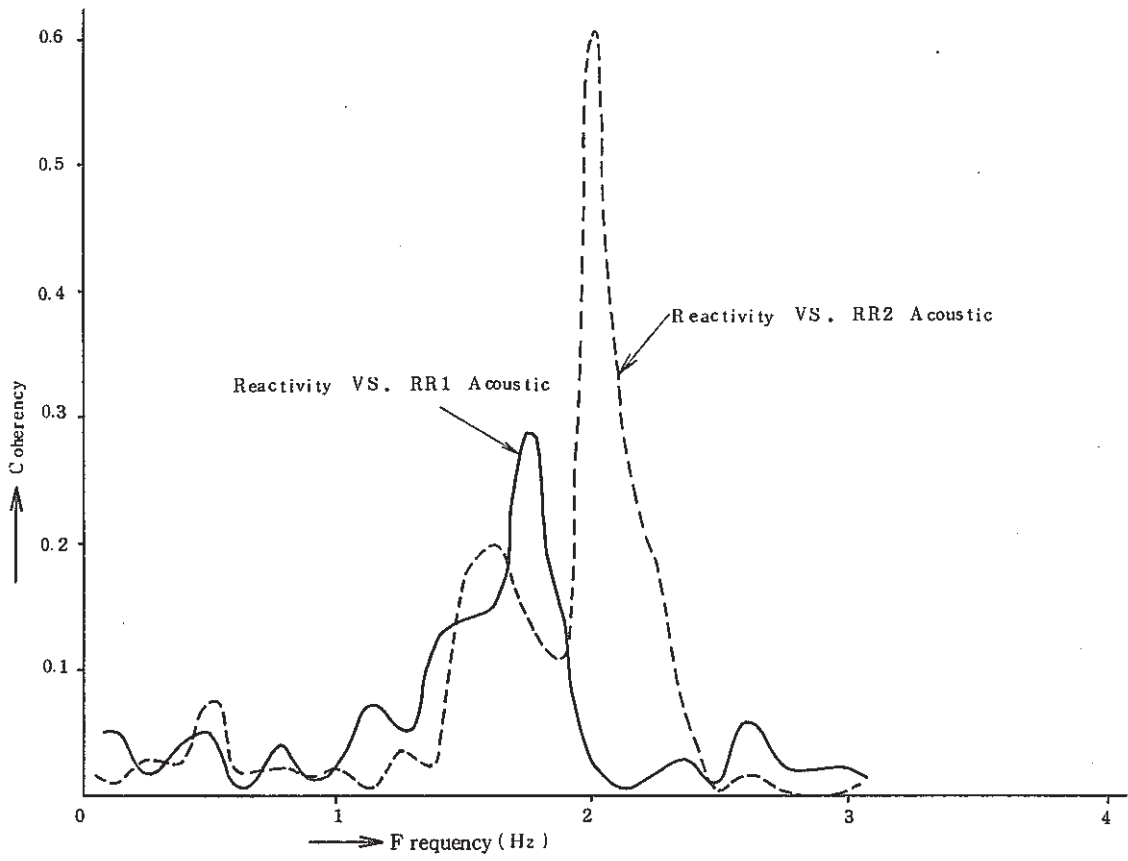


Fig.4.26 Coherence Functions between Reactivity Signal and RR1, RR2 Acoustic Signals (Test No. 50MW-3, RR1=RR2=511.1mm)

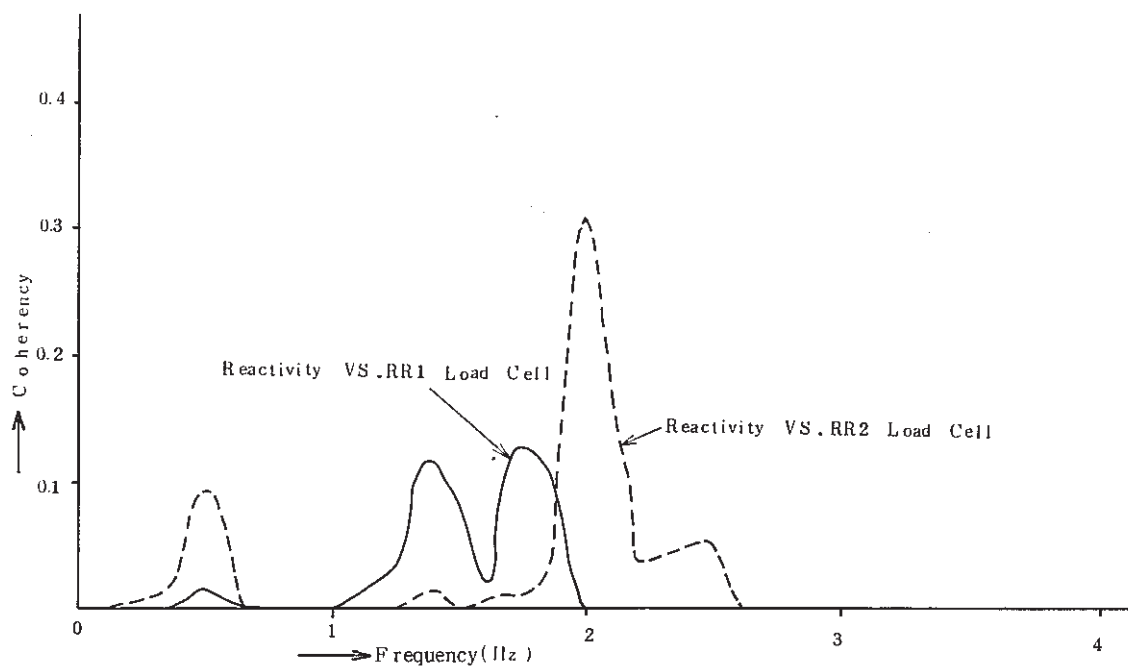


Fig.4.27 Coherence Functions between Reactivity Signal and RR1, RR2 Load Cell Signals (Test No. 50MW-3, RR1=RR2=511.1mm)

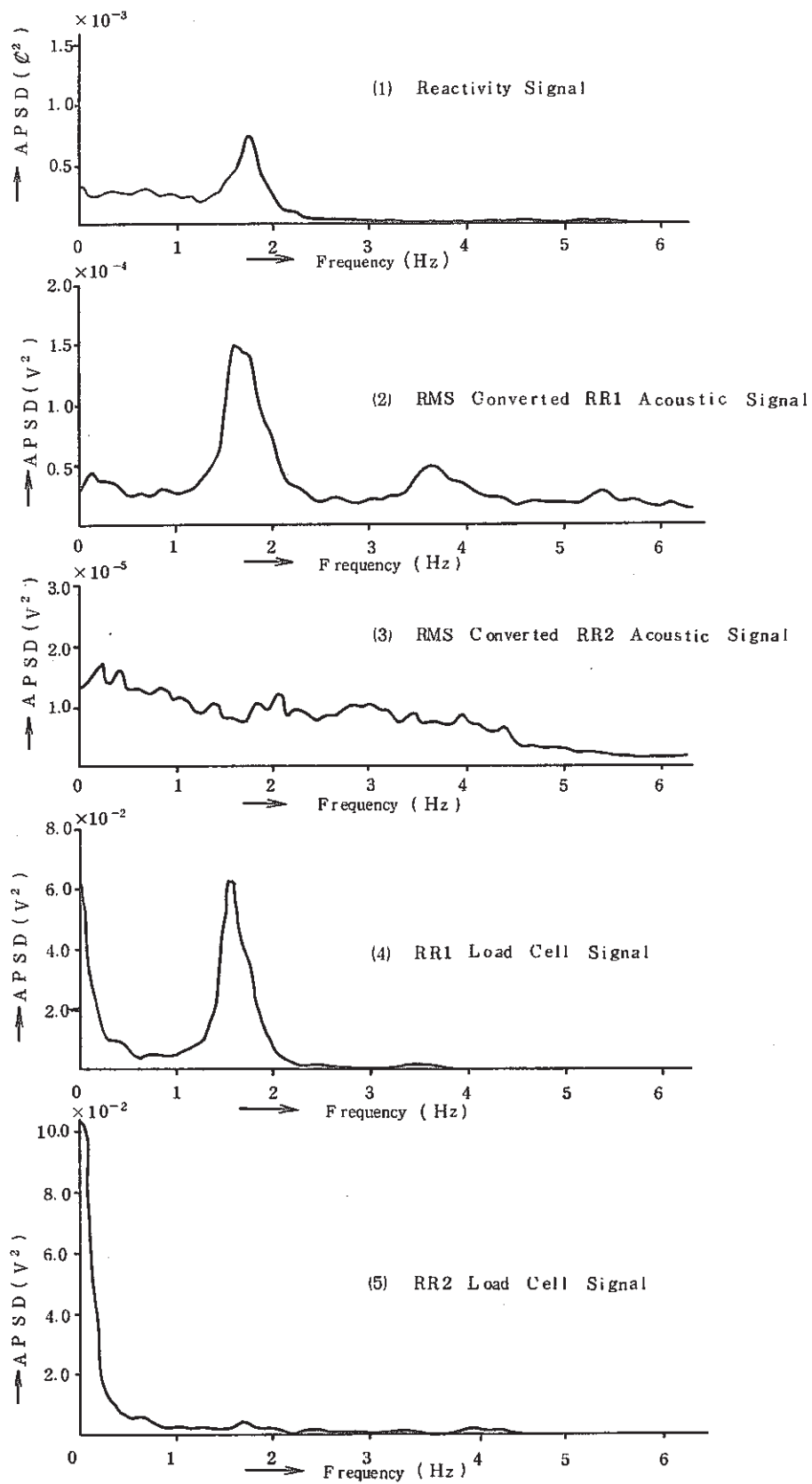


Fig.4.28 APSDs of Reactivity Signal, Acoustic Signals and Load Cell Signals
(Test No. 50MW-4, RR1=470.0mm, RR2=558.4mm)

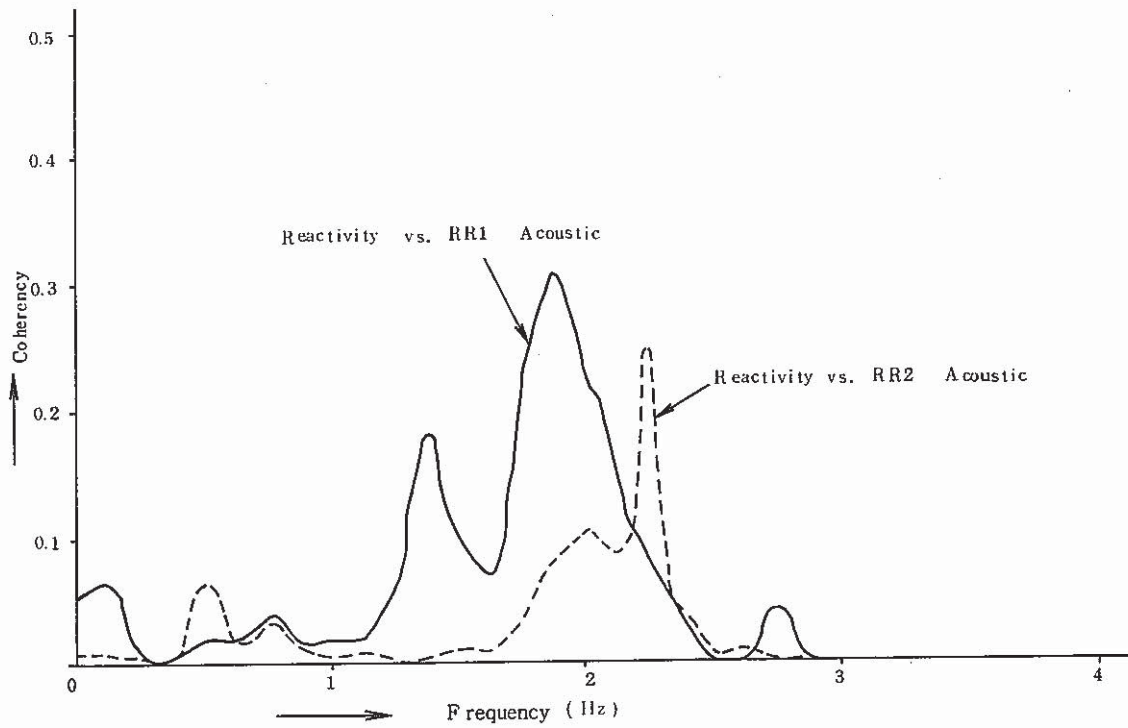


Fig.4.29 Coherenee Functions between Reactivity Signal and RR1,RR2
Acoustic Signals (Test NO. 50MW-4, RR1=470.0mm, RR2=558.4mm)

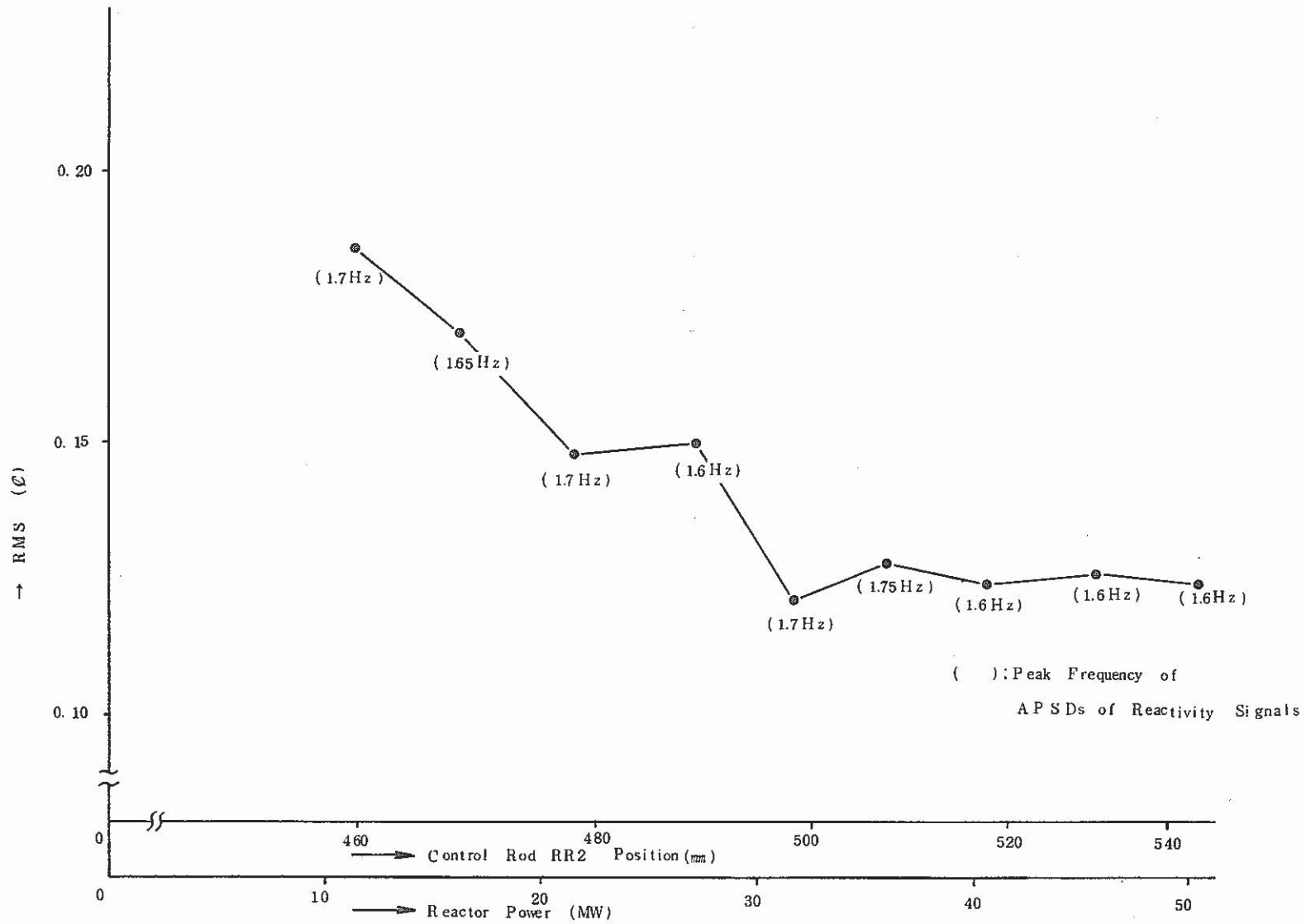


Fig.4.30 RMS Values of Reactivity Fluctuation (RR1=470.0mm)

5. 検 討

5.1 調整棒振動の固有振動数

調整棒は 1.6～2.1 Hz の振動数で振動することおよびその挿入長さが増減しても振動数は変化しないことが測定結果より明らかになった。ここでは、調整棒振動に対して 4 つの振動のパターンを想定し、各パターンでの固有振動数を概略計算し、実際の振動数 (1.6～2.1 Hz) と比較することにより調整棒振動のメカニズムを解析する。想定した 4 つのパターンを以下に示す。

- (1) 調整棒は上部のハンドリングヘッド部を上端にして振子運動をしている。
- (2) 調整棒はラッチ機構により延長管と一体になっており、延長管上部を固定端、調整棒下部を自由端として一体となった延長管と調整棒は曲げ振動をしている。
- (3) 調整棒は上部のハンドリングヘッド部をピン端、下部を自由端として曲げ振動をしている。
- (4) 調整棒は上部のハンドリングヘッド部を固定端、下部を自由端として曲げ振動をしている。

ここで、ピン端とはつぎの様な端の状態のことである。すなわち、棒の軸方向 x に垂直な変位を X とすると、振動方程式を解く際の端の境界条件は固定端では $X=0$ および $\frac{\partial X}{\partial x}=0$ であるのに対してピン端では $X=0$ ではあるが $\frac{\partial X}{\partial x} \neq 0$ であり $\frac{\partial^2 X}{\partial x^2}=0$ である。なお、自由端では $X, \frac{\partial X}{\partial x} \neq 0$ であり $\frac{\partial^2 X}{\partial x^2}, \frac{\partial^3 X}{\partial x^3}=0$ である。

調整棒の固有振動を計算するための計算式をつぎに示す。振子運動の振動数は(1)式となる。

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{m}} \quad (1)$$

ここで、 f_1 は振子の振動数 (Hz)、 g は重力加速度 (cm/sec^2)、 m は上端から重心までの距離 (cm) である。棒の曲げ振動の振動数は(2)式となる。

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\alpha^2}{l^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}} \quad (2)$$

ここで、 f_2 は曲げ振動の振動数 (Hz)、 l は棒の長さ (cm)、 E はヤング率 (g/cm^2)、 I は断面 2 次モーメント (cm^4)、 ρ は密度 (g/cm^3)、 A は断面積 (cm^2)、 α は振動数係数である。

計算にあたって、上述の m 、 l 、 I および A は Fig. 5.1 に示すように延長管、ハンドリングヘッド部および調整棒の形状を単純化して求める。また、 α は棒の両端の状態を境界

条件にして振動方程式を解いた結果から与えられる。これらの各パラメータを Table 5.1 に示す。 α_1 , α_2 , α_3 はそれぞれ第1次振動, 第2次振動, 第3次振動に対する振動数係数に対応する。また, パターン(2)の場合には, 延長管と調整棒が一体となったものを以下のような I (断面2次モーメント) と A (断面積) の一様な管と仮定している。

$$\left. \begin{aligned} I &= (I_o + I_i) \frac{l_1}{l_1 + l_2} + I_r \frac{l_2}{l_1 + l_2} \\ A &= (A_o + A_i) \frac{l_1}{l_1 + l_2} + A_r \frac{l_2}{l_1 + l_2} \end{aligned} \right\} \text{--- (3)}$$

ここで, I_o , I_i , I_r はそれぞれ外側延長管, 内側延長管, 調整棒の断面2次モーメントであり, A_o , A_i , A_r はそれぞれ外側延長管, 内側延長管, 調整棒の断面2次モーメントである。また, l_1 , l_2 はそれぞれ延長管, 調整棒の長さである。

Table 5.2 は想定した4つの振動のパターンにおける固有振動数の計算結果である。

パターン(1)の場合, 調整棒振動は約 0.5 Hz の振子運動となる。Fig. 4.22, 4.24, 4.26, 4.29 の反応度信号と調整棒音響信号間のコヒーレンス関数では 0.5 Hz 付近にこれらの信号間に相関がないのでパターン(1)の振動が存在することは確認できないが, 解析した 50 MW 時の反応度ゆらぎ APSD に 0.6 Hz 付近のピークが存在している場合があるので (Fig. 4.23, 4.25 参照), このパターン(1)の約 0.5 Hz の振子運動が 4.3 (2) で述べたような調整棒音響測定装置では測定できない振動, すなわち調整棒と下部案内管の衝突を伴わないような振動である可能性もある。

パターン(2)の場合, 第1次, 第2次振動数ともほぼ 0.1 Hz 以下の低周波数であり制御棒振動効果の解析対象周波数帯域外であるのでパターン(2)の振動の存在は確認できない。これは, たとえ 0.1 Hz 以下の低周波数帯域で制御棒振動効果が存在しているとしても他の要因 (原子炉入口温度や冷却材流量のゆらぎ) による反応度ゆらぎが大きく, この周波数帯域での制御棒振動効果の把握がほとんど不可能であるという理由による。

パターン(3)の場合, 第1次振動数は実際の振動数 (1.6 ~ 2.0 Hz) とほぼ一致しているので, 調整棒はほぼこのパターンの第1次振動であると考えられる。

パターン(4)の場合, 第2次振動数は実際の振動数に近いが, パターン(3)とパターン(4)の振動が同時に存在する可能性はないので, パターン(4)の振動はほぼ存在しないと考えられる。

以上より, 調整棒の 1.6 ~ 2.0 Hz の振動はパターン(3)の上部のハンドリングヘッド部をピン端, 調整棒下部を自由端とした曲げ振動であると考えられる。

5.2 反応度ゆらぎの推定計算

調整棒の振動が反応度に与えるゆらぎを評価するために次のような場合を想定して推定計算を行った。調整棒は垂直に立ったままで水平方向に中心位置から1mmの振幅で移動するものとし、その移動モードは同期モードでは炉心中心と調整棒中心位置を結ぶ直線上で一方が炉心に近い位置の時は他方も近い位置で、一方が炉心から遠い位置の時は他方も遠い位置に移動するとする。ランダムモードでは、それぞれの調整棒は独立に移動し、移動方向もランダムであるとする。以上の場合の反応度ゆらぎの推定 rms 値を Table 5.3 に示してある。

計算手順を以下に示す。まず、常陽-3711 常陽核設計(Ⅲ)核設計計算書では反応度変化率 α

$$\alpha = \frac{\text{(与えられた挿入状態において、1 mm 変位した場合の反応度変化)}}{\text{(与えられた挿入状態における制御棒価値)}}$$

と定義して、制御棒振動による反応度変化を計算しているが、ここではこの α の値を用いて、この計算書と同様な手法で計算した。この α は 2次元 R-Z モデルで 6 群拡散計算により求められており、安全棒上端、調整棒下端で臨界時には $\alpha = 0.0044 \text{ mm}^{-1}$ となっている。制御棒振動による反応度変化は

反応度変化 ($\% \Delta K/K$) = α (mm^{-1}) \times 振動の振幅 (mm) \times 余剰反応度 ($\% \Delta K/K$)
で求められる。50 MW で Fig. 4.30 に示す測定を行った時の余剰反応度は $0.90 \% \Delta K/K$ であったので、

$$\begin{aligned} \text{反応度変化} &= 0.0044 \times 1 \times 0.90 \text{ (\% } \Delta K/K \text{)} \\ &= 0.79 \text{ (}\text{)} \end{aligned}$$

となる。ここで $\beta = 0.50 \% \Delta K/K$ を使用した。これが同期モードでの最大値に相当し、rms 値 (2 本分) としては

$$0.79/\sqrt{2} = 0.56 \quad (\text{)} \quad (\text{)} \quad (\text{)}$$

となる。次にランダムモードの場合は、等方向に振動しているから θ 方向に振動する確率を $P(\theta)$ とすると

$$\int_0^{2\pi} P(\theta) d\theta = 1$$

であり

$$P(\theta) = \frac{1}{2\pi}$$

となる。ただし θ は炉心中心と制御棒中心位置を結ぶ直線からの角度である。1本の制御棒の振動による反応度変化の最大値を ρ_{\max} とすると、 θ 方向へ変位している時の反応度変

化は $\rho_{\max} \cos \theta$ となる。1本の制御棒の振動による反応度ゆらぎの標準偏差 σ は

$$\begin{aligned}\sigma &= \sqrt{\int_0^{2\pi} (\rho_{\max} \cos \theta)^2 P(\theta) d\theta} \\ &= \frac{\rho_{\max}}{\sqrt{2}}\end{aligned}$$

となる。1本の調整棒の振動による標準偏差は同期モードでの最大値を用いて

$$\frac{0.79}{\sqrt{2}} = 0.28 \quad (\text{C})$$

となる。2本分の調整棒のランダム振動による標準偏差は

$$\sqrt{2 \times (0.28)^2} = 0.40 \quad (\text{C})$$

となり、これがとりもなおさずランダムモードでの rms 値である。なお、計算書では安全棒の振動も考慮しているが、安全棒の振動の反応度への寄与は調整棒に比べて十分小さいので、ここでは無視した。

モデルとしてはランダムモードが、より現実に近いのであるが、測定値は更に低い値となっている。このことより、調整棒は下部案内管との片側 1 mm の間隙いっぱいには振動しているのではなく、平均的にはより小さい振幅で振動しているものと考えられる。制御棒振動の水中モックアップ試験（付録 1 参照）によると、制御棒は円を描きながら振動しており偏心して下部案内管に衝突するものも観測されている。偏心していれば間隙いっぱいに振動しなくても下部案内管との衝突は生じるので測定されている現象は説明できる。この制御棒の偏心は装置の取付け誤差、回転プラグの位置決め誤差及び回転プラグや炉心構造物の熱変位が原因として考えられる。

Table 5.1 Values of Parameters

Pattern Parameter	Pattern (1)	Pattern (2)	Pattern (3)	Pattern (4)
g (cm/sec ²)	980			
m (cm)	110			
α_1		1.875	3.927	1.875
α_2		4.694	7.069	4.694
α_3		7.855	10.210	7.855
l (cm)		940	220	220
E (g/cm ²)		1.9×10^9	1.9×10^9	1.9×10^9
I (cm ⁴)		27.2	19.2	19.2
ρ (g/cm ³)		8.0	8.0	8.0
A (cm ²)		9.24	3.86	3.86

Table 5.2 Calculated Results of Natural Frequency of Regulation Rod

Vibration Pattern	The 1st Order Mode Frequency	The 2nd Order Mode Frequency	The 3rd Order Mode Frequency
Pattern (1)	0.48 Hz		
Pattern (2)	0.017 Hz	0.11 Hz	0.29 Hz
Pattern (3)	1.7 Hz	5.7 Hz	12.0 Hz
Pattern (4)	0.40 Hz	2.5 Hz	7.0 Hz

Table 5.3 Calculated and Measured Reactivity Fluctuation (r.m.s. value) at 50 MW

CALCULATION ⁽¹⁾		EXPERIMENT
SYNCHRONIZED MODE ⁽²⁾ VIBRATION	RANDOM MODE ⁽³⁾ VIBRATION	
$\pm 0.56 \text{ } \rho$	$\pm 0.40 \text{ } \rho$	$\pm 0.13 \text{ } \rho$

(1) RR1 and RR2 Vibrate $\pm 1 \text{ mm}$ Horizontaly

Core Center



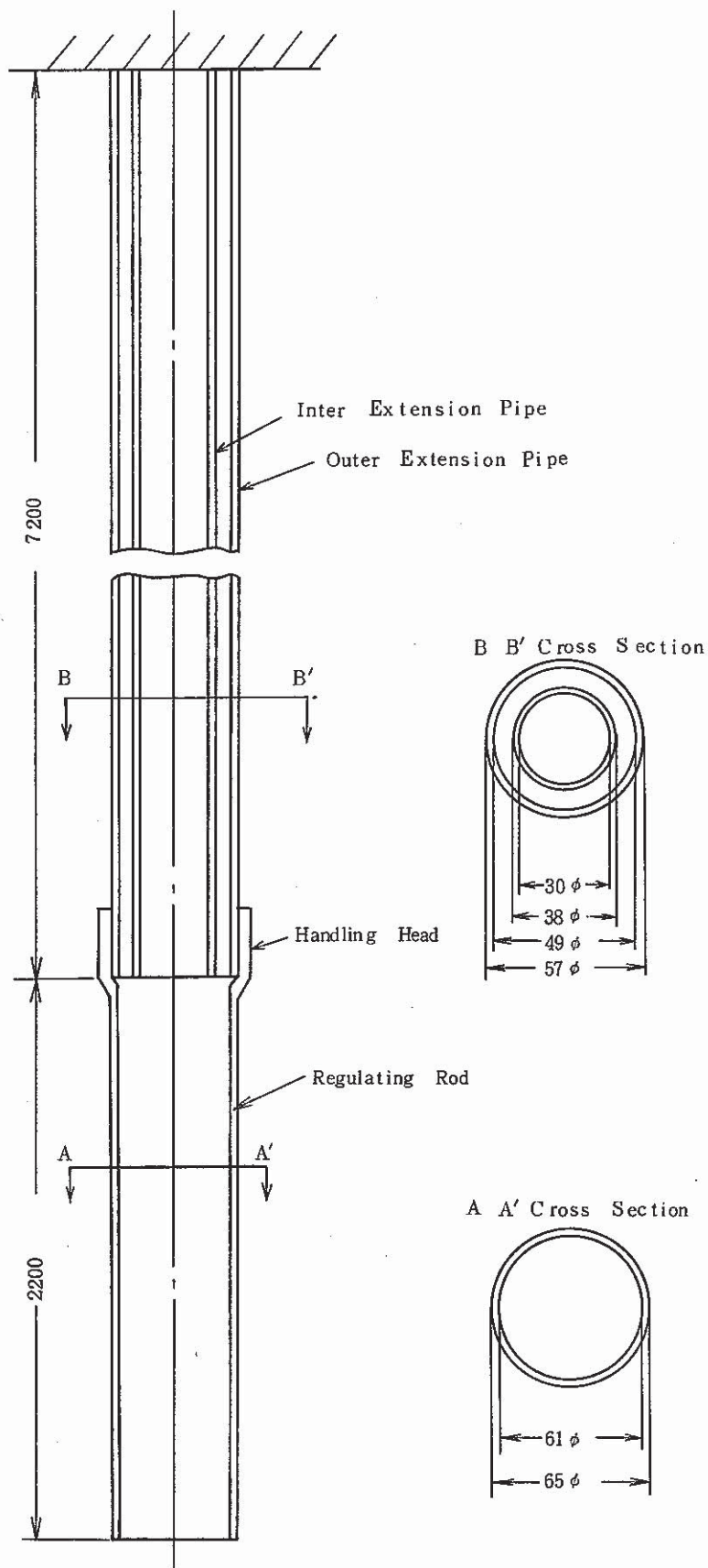


Fig.5.1 Extension Pipe, Handling Head and Regulating Rod

6. 結 言

原子炉出力約 1.3 kW で 1 次冷却材流量を変化させて行った測定結果より以下のことが明らかになった。

- (1) 制御棒駆動機構ハウジング上で検出される衝撃音は 1 次冷却材流量に依存し、100 % 流量に近付くと顕著になる。
- (2) その衝撃音の頻度は約 2 Hz である。
- (3) その衝撃音そのものは 400 ~ 550 Hz の周波数で検出される。
- (4) この衝撃音が顕著になると、中性子束にも約 2 Hz でゆらぐ成分が生じる。
- (5) 低出力では炉内中性子検出器の方が炉外中性子検出器よりも炉内の情報をよりよく検出できる。

原子炉出力 20 kW で RR2 を 245.7 mm から 500.0 mm まで引抜いて測定した結果および各制御棒を 300 mm に引抜いて測定した結果より以下のことが明らかになった。

- (6) 中性子束ゆらぎの 1 ~ 3 Hz 成分の rms 値は RR2 を引抜くにつれて低下する。
- (7) rms 変換した RR2 ハウジング音響信号および RR2 ロードセル信号の 1 ~ 3 Hz 成分の rms 値は中心引抜き位置付近で最大となる。
- (8) 中性子束、rms 変換 RR2 ハウジング音響信号および RR2 ロードセル信号には約 2 Hz でゆらぐ成分があり、その周波数は RR2 の引抜き位置には依存しない。
- (9) 各信号の約 2 Hz のゆらぎ成分で、RR 振動の影響によるものは周波数が低目であり、SR 振動の影響によるものは高目である。

原子炉出力約 50 MW で調整棒の位置のパターンを 4 つのパターンに変化させた場合のデータの解析を行った。解析は測定した反応度信号、調整棒音響信号および調整棒ロードセル信号の自己パワースペクトル密度や信号間のコヒーレンス関数を用いた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (10) 反応度の 1.6 ~ 2.0 Hz のゆらぎはほぼ調整棒振動効果によるものであることが明らかになった。
- (11) 反応度ゆらぎの APSD に約 0.6 Hz のピークが存在する場合がある。このピーク要因は現在不明であるが、このピークは音響信号に表われない約 0.6 Hz の調整棒振動すなわち調整棒と下部案内管の衝突を伴わない調整棒振動の存在が要因であると推論される。
- (12) 調整棒 1 (RR1) の振動が反応度ゆらぎに影響を与える度合と調整棒 2 (RR2) の振動が影響を与える度合の相対的な関係は反応度信号と音響信号間のコヒーレンス関係に

よりほぼ把握できることが判った。このことは、このコヒーレンス関数と調整棒位置のパターンが良い対応を示していることにより確認された。

50 MW への出力上昇中に各出力で調整棒振動効果による反応度ゆらぎを測定した結果、以下のことが明らかになった。

(13) 出力上昇に伴い反応度ゆらぎの rms 値は減少し、50 MW では rms 値は約 0.125 ϕ であり、原子炉制御にはほとんど外乱を与えない。

(14) 調整棒の挿入長さが増加しても振動効果による反応度ゆらぎのピーク周波数は変化しない。

調整棒振動に対して 4 つの振動のパターンを想定し、各パターンでの固有振動数を概略計算し、実際の振動数と比較することにより調整棒振動のメカニズムを解析した結果、以下のことが明らかになった。

(15) 調整棒の 1.6 ~ 2.0 Hz の振動はほぼ上部のハンドリングヘッド部をピン端、調整棒下部を自由端とした曲げ振動であると考えられる。

50 MW での調整棒振動による反応度ゆらぎの推定計算を行った結果、以下のことが明らかになった。

(16) 調整棒の振動幅は、平均値としては、下部案内管との片側 1 mm の間隙よりも小さいと考えられる。

以上の結果を総合すると次のことが言える。

- (1) 1 次冷却材の流動により引き起こされる制御棒(調整棒)振動の周波数は約 2 Hz である。
- (2) 原子炉出力 50 MW での、制御棒振動による反応度ゆらぎの rms 値は約 0.1 ϕ であり、原子炉制御にはほとんど外乱を与えない。

付録 1. 水中モックアップ試験

既に報告されている制御棒水中試験結果の中から制御棒振動に関係のあるをまとめて以下に述べる。

調整棒振動に関しては次のような試験結果が報告されている。

- (1) 振幅は複振幅で 0.05 mm から 1.5 mm におよんでおり、約 70% は 0.65 mm 以下の振幅である。
- (2) 振動数は 2 ~ 5 Hz に分布しており、2.2 Hz および 4.5 Hz の振動数が卓越している。
- (3) ストロークおよび偏心を変えて行った実験では、これらのパラメータの変化に対して特に規則的な応答はみられなかった。
- (4) 粘性による振動の変化はほとんどないものと考えられる。

(以上「高速実験炉調整棒駆動機構水中機能動作試験及び、安全棒駆動機構 Na 中連続動作試験」SJ 201 73-27 より)

安全棒振動に関しては、MK-II B型制御棒の防振機構を取りはずした制御棒が MK-I の安全棒に類似しているため、その試験結果を述べる。

- (1) 頻度の高い振動周期は 0.8 ~ 0.9 秒 (1.1 ~ 1.3 Hz) 程度である。
- (2) 振動は全ての試験条件について上から見て時計方向の円運動となった。
- (3) ストロークによる影響はあまり顕著ではないが、流量に対しては 190 l/min (MK-II での 100% 流量相当) と 250 l/min の比較で振幅が 2 倍前後 (両振幅で最高約 3 mm が 6.5 mm 近くに) に増大している。
- (4) 偏心量に対しては 0 mm よりも 5 mm 偏心させた方が振幅が大きくなっている。
- (5) 制御棒は延長管と、ほぼ一体の円柱となって振動し、グリップ部部の剛性が十分高いことがわかる。

(以上「高速実験炉「常陽」照射用炉心制御棒水中試験」SJ 201 76-09 より)

付録2. 反 応 度 計

1. 概 要

本装置は運転中の原子炉の反応度変化を瞬時に記録するもので、これを用いて制御棒・燃料棒などの反応度を測定することができます。

また、高速炉においては冷却材の沸騰や燃料破損・溶融などの異常状態を早期に診断する、いわゆる異常診断装置としても使用することもできます。

2. 仕 様

(1) 指示方式 記録計

(2) 反応度測定レンジ

フルスケール ± 5 ℄, ± 10 ℄, ± 20 ℄, ± 50 ℄
 ± 1 \$, ± 2 \$, ± 5 \$, ± 10 \$
 以上 8 レンジ

(3) 入出力電圧

入 力 - 0.1 ~ - 1.0 V

出 力 0 ~ ± 10 V

(4) 精 度

直 線 性 フルスケールの ± 5 % 以下

ドリフト ± 5 % / 8 Hr 以下
 (15 ~ 35 °C)

(5) 周波数特性 10 Hz

(6) 電 源 AC 100 V ± 10 %, 50 Hz

3. 動作原理

原子炉の動特性は反応度 ρ と炉出力 n との連立微分方程式によって表わされます。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - r\beta}{\ell} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + S \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{r\beta_i}{\ell} n - \lambda_i C_i \quad (2)$$

C_i, λ_i : 夫々第 i 組の遅発中性子先行核の濃度と崩壊定数

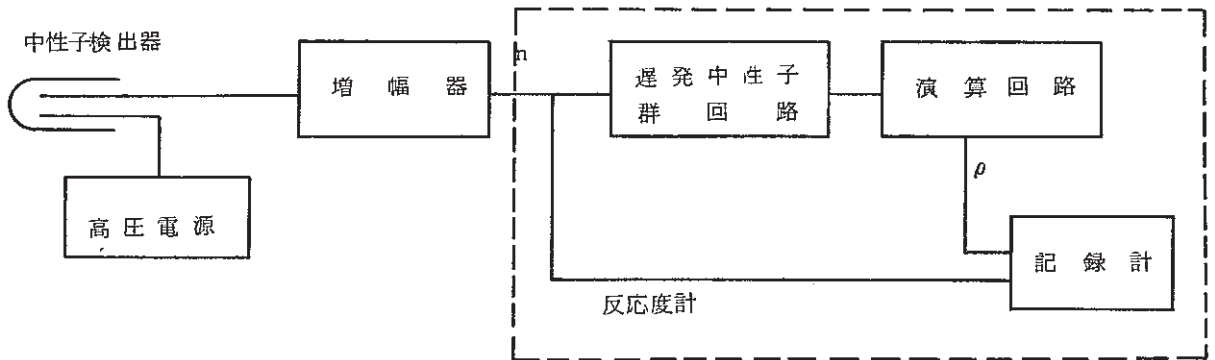
S : 中性子源の強さ

$$r = \beta_{\text{eff}} / \beta$$

β : 無限媒質の場合の遅発中性子割合 (β_{eff} : 遅発中性子割合)

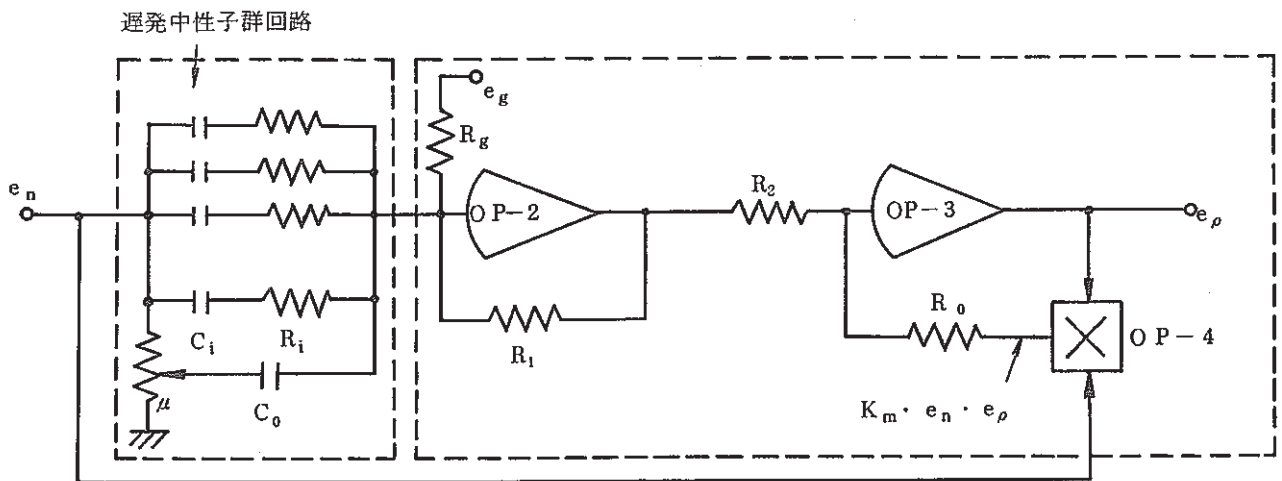
この方程式において C_i を消去すれば ρ と n との関係式が得られます。いわゆる、原子炉シミュレータはその関係式を用いて、 ρ を入力とした場合の出力として n を求めるような回路になっていますが、反応度計は逆に n を与えて ρ を求めるものです。

第1図は反応度計のブロック・ダイアグラムで、中性子検出器の出力を増幅器で増幅し



第1図 反応度計のブロック・ダイアグラム

て、反応度計に加えます。反応度計は遅発中性子群回路 (Delayed Neutron Circuit)、演算回路 (Operational Circuit) ならびに記録計からなっており、記録計の出力には炉出力 n と反応度 ρ が記録されます。反応度計の主要部をやや詳しく示すと第2図のようになります。



第2図 反応度計の主要部

(以上「原子炉反応度計」取扱説明書)

付録3. エイリアシング

デジタルデータ解析のためのサンプリングを、余り広いサンプリング間隔で行うと、もとのデータの低周波成分と高周波成分とが混合してしまう。この問題はエイリアシング (aliasing) と呼ばれており、直接アナログデータ処理をする時には起こらないが、AD変換によって行われるすべてのデジタル処理に必ずつきまとう誤差の主要な原因となるものである。古い映画を見ると、車が前方に走っているにもかかわらず、車輪が逆に回転していることに気付く時があるが、これは、映画カメラによるサンプリングの結果生じたエイリアシング誤差の簡単な例である。

もとのデータの周波数成分を定めるためには、1サイクル当り少なくとも2回サンプルされることが必要である。したがって、 Δt 秒の間隔でサンプリングすることによって定めることができる最高周波数は $1/2 \Delta t$ Hz である。このとき、もとのデータにおける $1/2 \Delta t$ Hz 以上の周波数は Fig. 1 に示すように、より低い周波数範囲のデータと混合してしまう。この遮断周波数 $f_c = 1/2 \Delta t$ は、Nyquist 周波数とか、折りたたみ周波数とか呼ばれている。特に、 $0 \leq f \leq f_c$ の範囲の任意の周波数 f に対して、 f でエイリアスされる高周波の周波数は $(2f_c \pm f)$, $(4f_c \pm f)$, \dots , $(2n f_c \pm f)$, \dots と定められる。

このエイリアシングの問題を処理するためには、2つの実際的な方法がある。第1の方法は、 Δt を十分小さく選ぶことであり、一般に f_c を予期される最大周波数より 1.5 から 2 倍大きく選ぶのが適当である。第2の方法は、サンプリングする前にあらかじめデータをフィルタし、最大周波数以上の情報が含まれていないようにすることである。

(以上 J.S. Bendat, A.G. Piersol 著「ランダムデータの統計的処理」)

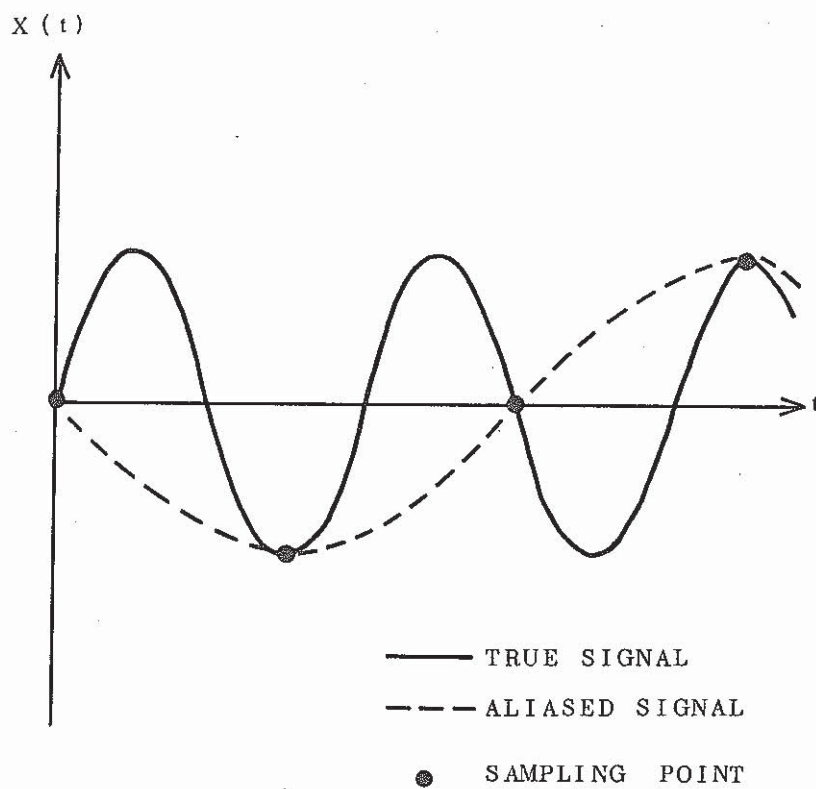


Fig. 1 Example of aliasing